

WYZNACZANIE DOKŁADNOŚCI OBRABIAREK

Polskie Normy określają zarówno ogólne przepisy badania obrabiarek jak i szczegółowe metody wyznaczania poszczególnych odchyłek oraz tolerancje ograniczające ich dopuszczalne wartości.

PN-ISO 230-1 „Przepisy badania obrabiarek. Dokładność geometryczna obrabiarek pracujących bez obciążenia lub w warunkach obróbki wykańczającej” oraz np.. PN-M-55651 „Warunki odbioru tokarek kłowych. Badania dokładności”.

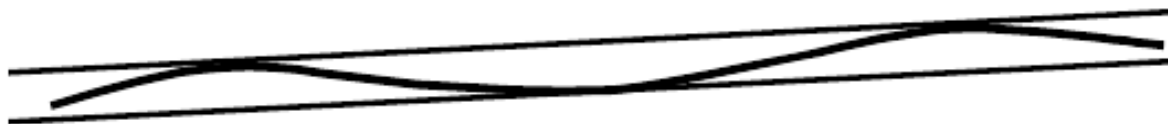
Badając dokładność geometryczną należy sprawdzić podane niżej cechy kształtu, położenia i przemieszczenia linii lub powierzchni obrabiarki.

Są to:

- Prostoliniowość,
- płaskość,
- równoległość,
- równoodległość,
- pokrywanie się,
- prostopadłość,
- obrót.

Prostoliniowość.

Linia uważana jest za prostą na danej długości, jeżeli wszystkie jej punkty zawarte są między dwiema liniami prostymi, równoległymi do ogólnego kierunku linii, których odległość jest równa tolerancji.



Płaskość.

Powierzchnia jest uważana za płaską w ramach danego zakresu pomiaru, jeżeli wszystkie jej punkty są zawarte wewnątrz dwóch płaszczyzn równoległych do ogólnego kierunku powierzchni i rozsuniętych względem siebie na pewną odległość równą tolerancji.

Prostopadłość.

Pomiary obejmują:

- prostopadłość linii prostych i płaszczyzn,
- prostopadłość przemieszczenia.

Dwie płaszczyzny, dwie linie proste lub linia prosta i płaszczyzna są do siebie prostopadłe, kiedy odchyłka równoległości względem kątownika standardowego nie przekracza wartości zadanej.

Pomiar prostopadłości sprowadza się więc w praktyce do pomiaru równoległości. Kątownikiem odniesienia może być kątownik metrologiczny lub poziomica kątowa, jak też mogą go tworzyć płaszczyzny lub linie kinematyczne.

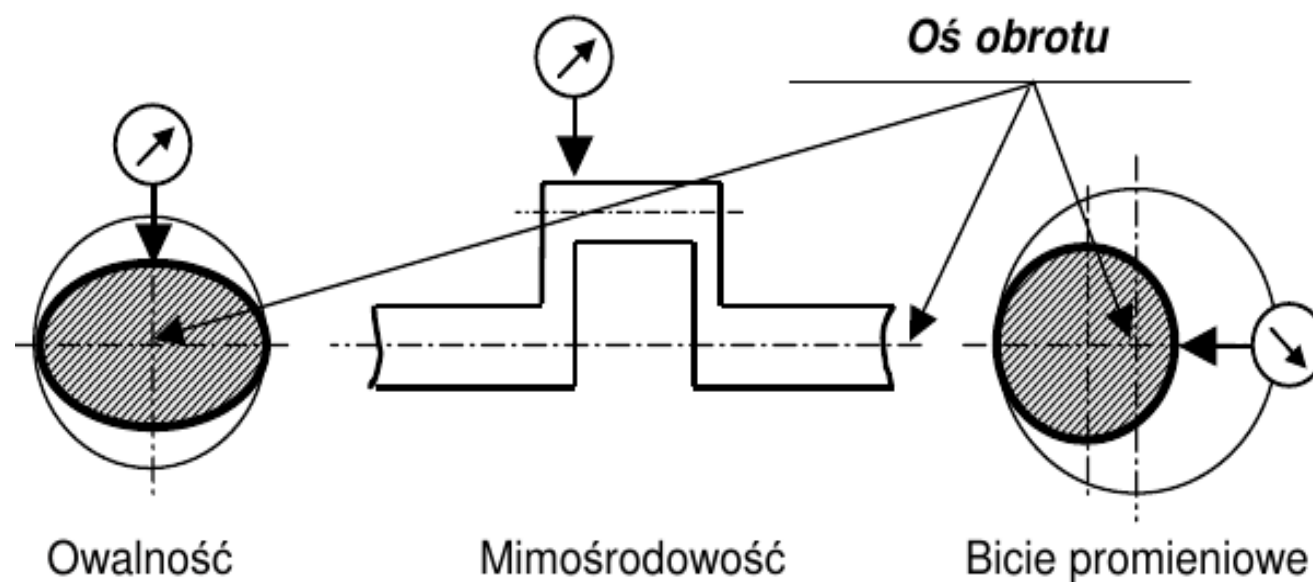
Obrót

Pomiary odnoszące się do ruchu obrotowego obejmują:

- bicie,
- okresowe przesunięcie osiowe,
- bicie czołowe.

Bicie mierzone jest wynikiem złożenia:

- bicia promieniowego osi,
- owalności części,
- mimośrodowości,
- błędu łożyskowania.



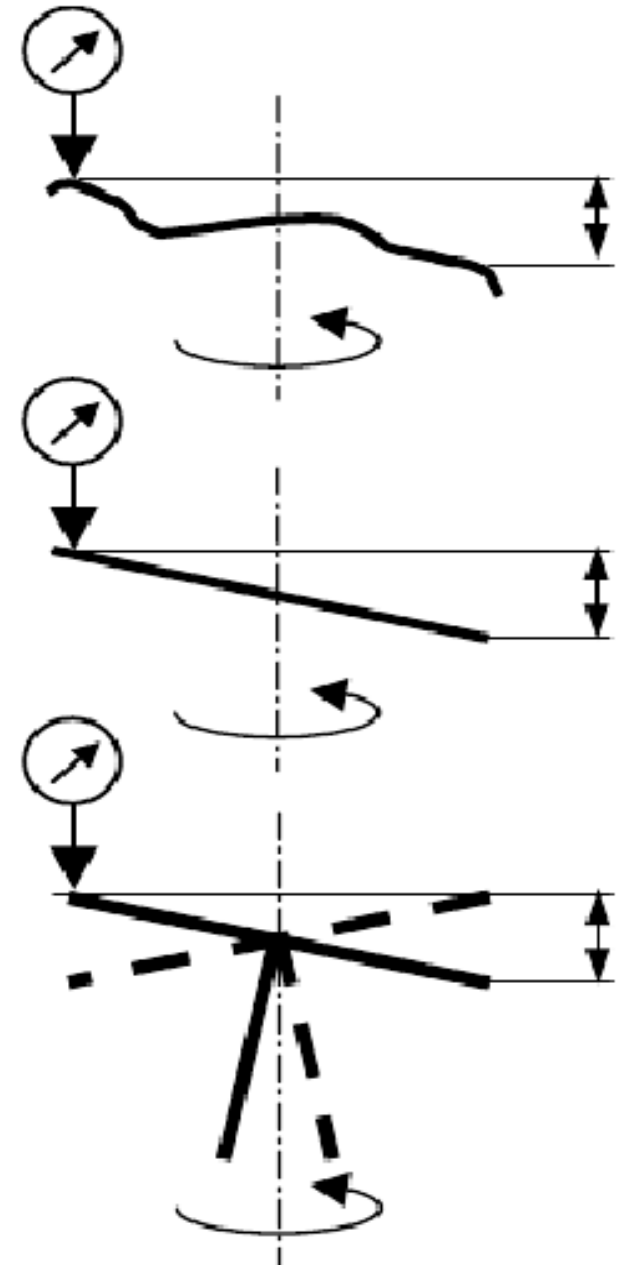
Obrót

Pomiary odnoszące się do ruchu obrotowego obejmują:

- bicie,
- okresowe przesunięcie osiowe,
- bicie czołowe.

Bicie mierzone jest wynikiem złożenia:

- bicia promieniowego osi,
- owalności części,
- mimośrodowości,
- błędu łożyskowania.

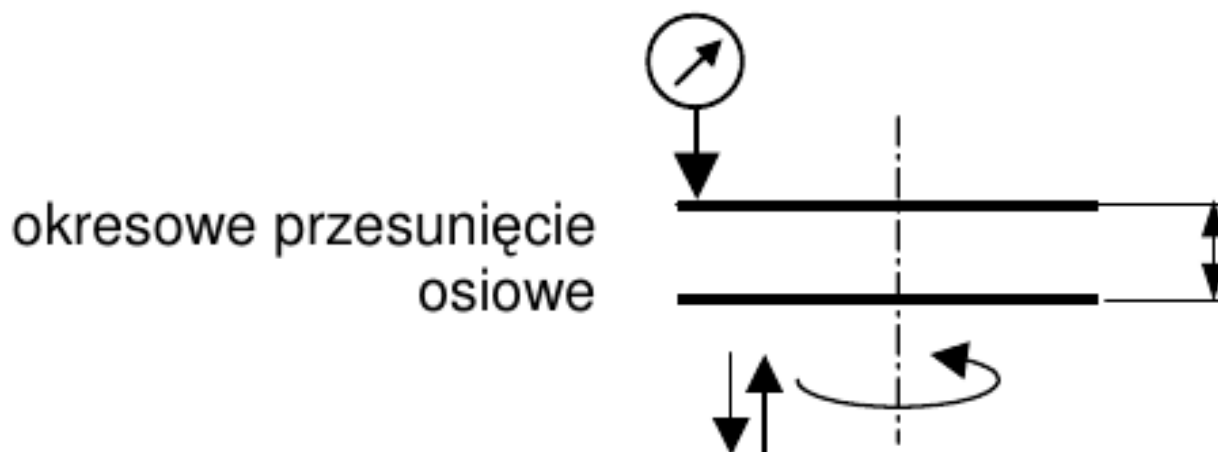


Okresowe przesunięcie osiowe to zakres ruchu posuwisto-zwrotnego wzdłuż osi obracającej się części po wyeliminowaniu luzu osiowego.

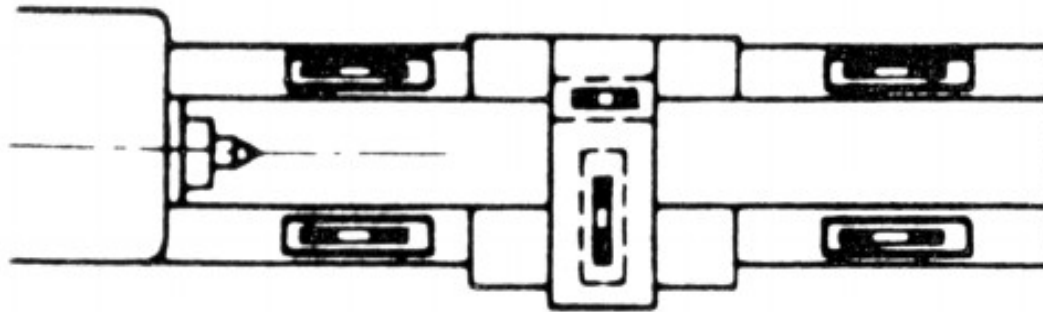
Bicie czołowe to wada powierzchni płaskiej, która podczas obracania się wokół osi nie pozostaje w płaszczyźnie prostopadłej do tej osi.

Bicie to jest określone odległością między dwiema płaszczyznami prostopadłymi do osi, w zakresie których poruszają się punkty powierzchni podczas jej obracania.

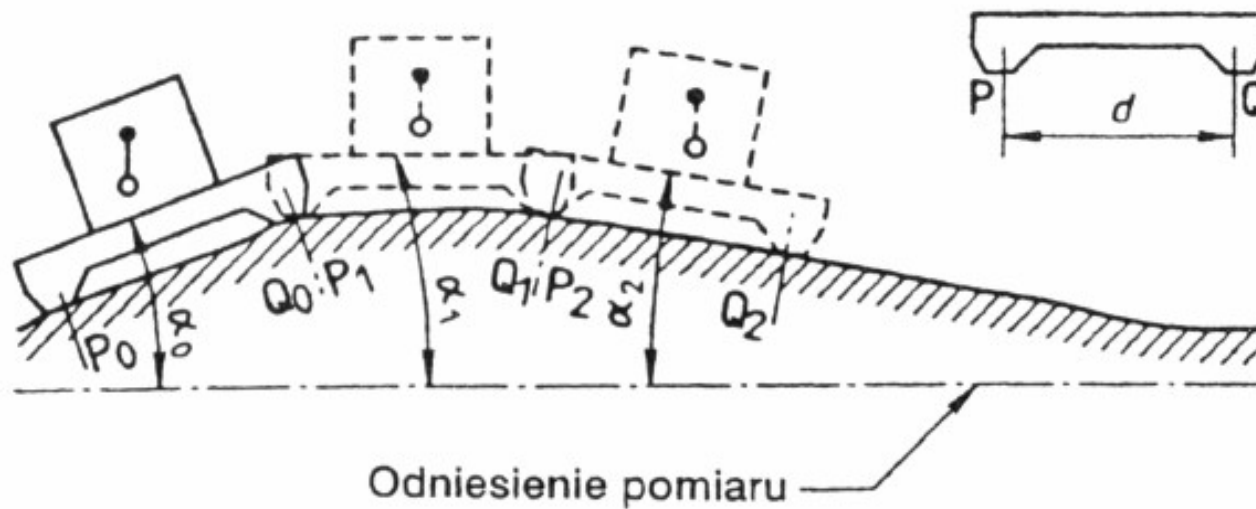
Bicie czołowe jest wynikiem różnych wad powierzchni oraz obrotu wokół osi.



Sprawdzenie prostoliniowości wzdłużnej powierzchni prowadnic w płaszczyźnie pionowej.



Przyrządem pomiarowym jest poziomnica precyzyjna, którą ustawia się kolejno wzdłuż sprawdzanej linii. Do ustawienia służy element ruchomy (mostek) stykający się z linią, która ma być sprawdzana, w dwóch punktach P i Q rozstawionych na odległości d .



Element ruchomy jest przemieszczany w taki sposób, że w dwóch kolejnych pozycjach P_0Q_0 i P_1Q_1 , pozycja P_1 pokrywa się z pozycją Q_0 .

Poziomnicą mierzy się kąty: α_0 i α_1

elementu ruchomego w stosunku do odniesienia pomiaru.

Wyniki przygotowuje się w sposób pokazany na rysunku.

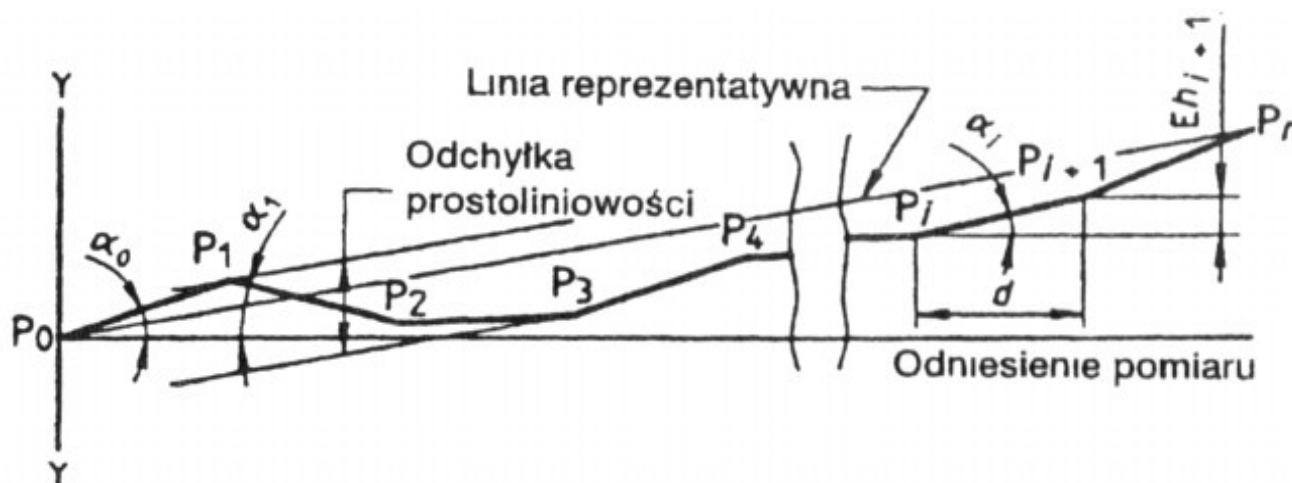
W prostokątnym układzie współrzędnych rysuje się krzywą, w odpowiedniej skali nanosząc parametry:

na osi odciętych – kolejne odległości d występow elementu ruchomego,

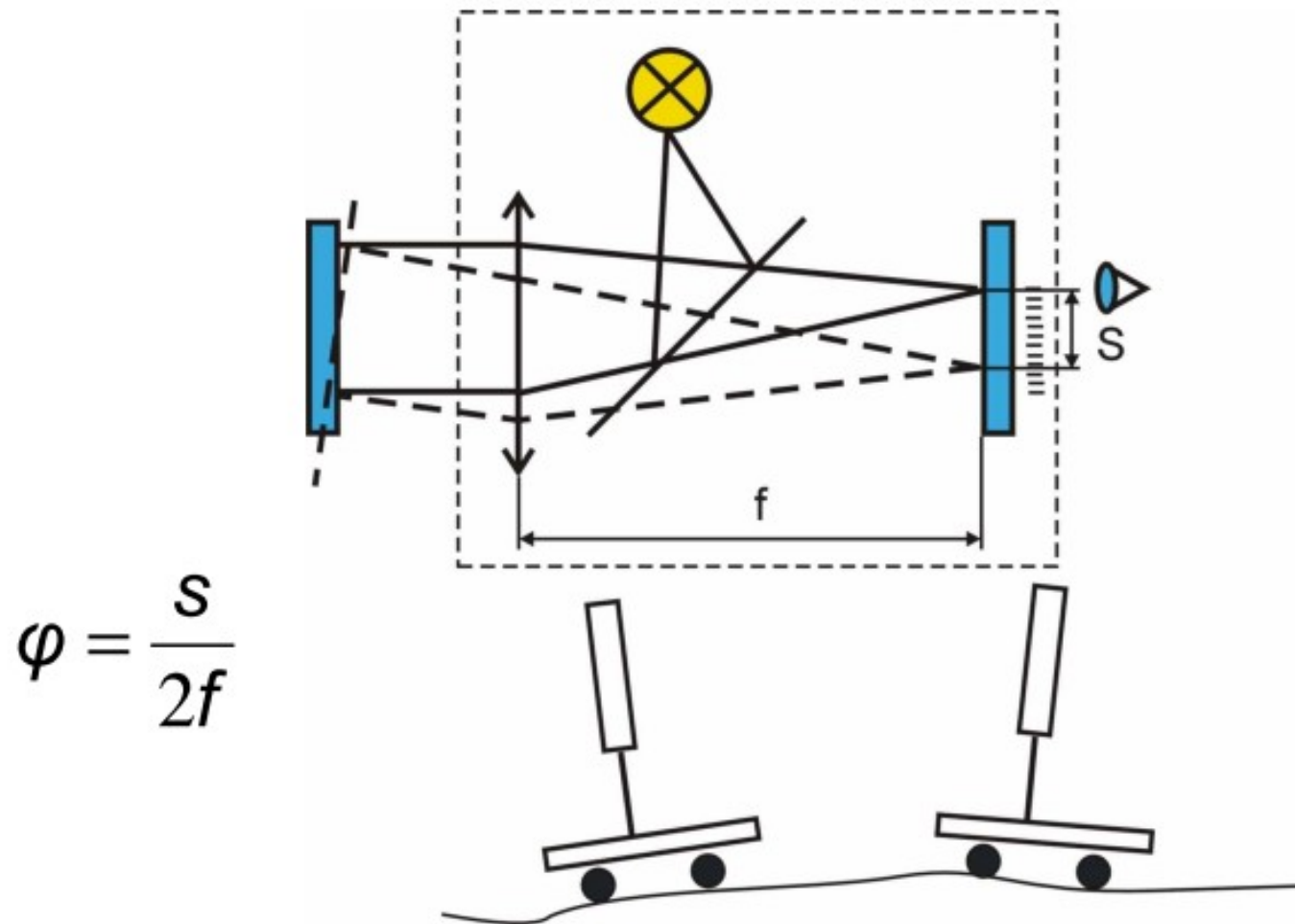
na osi rzędnych – różnice poziomu względem odniesienia pomiaru.

Tą względną różnicę poziomu oblicza się według wzoru:

$$Eh_{i+1} = d \cdot \operatorname{tg} \alpha_i$$

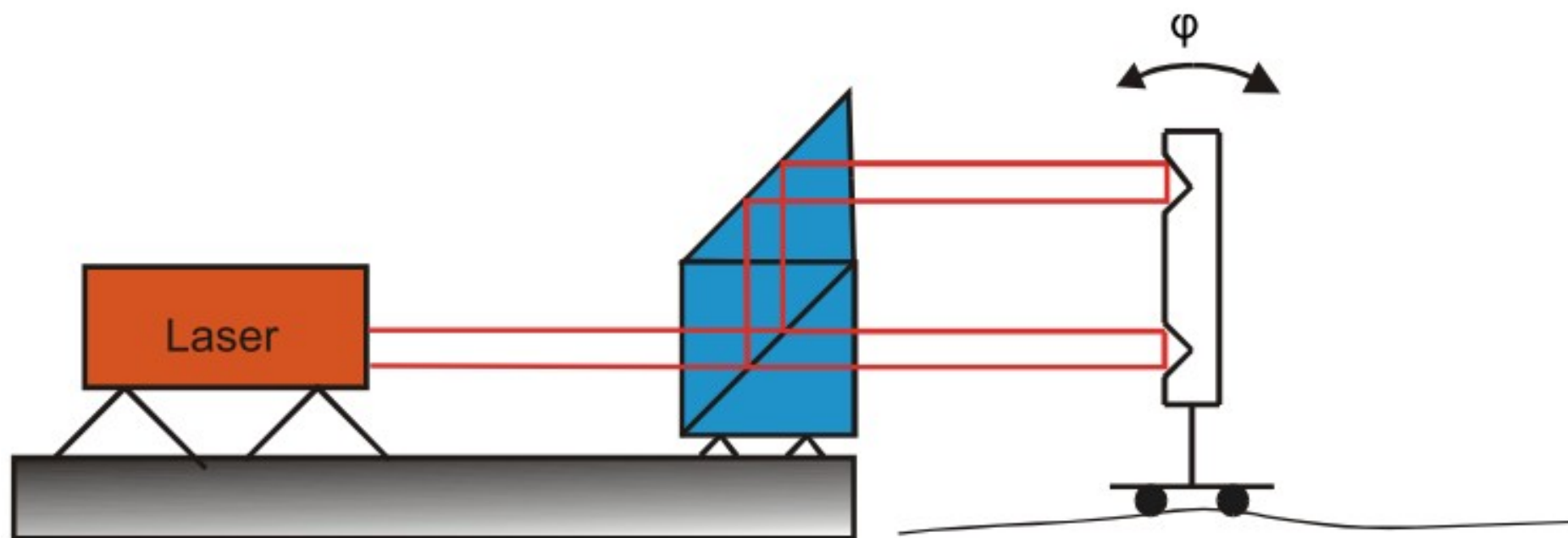


Luneta autokolimacyjna.

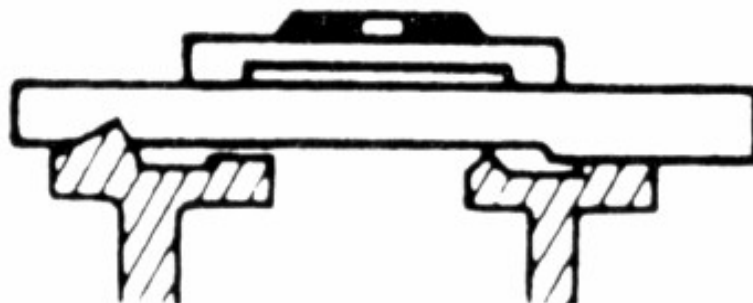


Odchyłkę prostoliniowości ustala się jako odległość (mierzoną w kierunku osi Y) między dwiema liniami prostymi równoległymi do linii reprezentatywnej, stykającymi się z krzywą w punkcie najwyższym i najniższym.

Interferometr laserowy.



Sprawdzenie prostoliniowości poprzecznej powierzchni prowadnic w płaszczyźnie pionowej

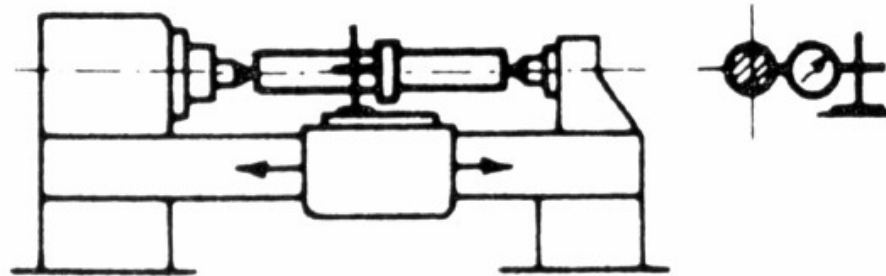


Przyrządem pomiarowym jest poziomnica precyzyjna, którą ustawia się poprzecznie do kierunku prowadnic na elemencie ruchowym (mostku).

Pomiaru dokonać należy w kilku równoległych położeniach wzdłuż łoża.

Różnice odczytów zmierzone w dowolnym z położen nie powinny przekraczać odchyłek dopuszczalnych.

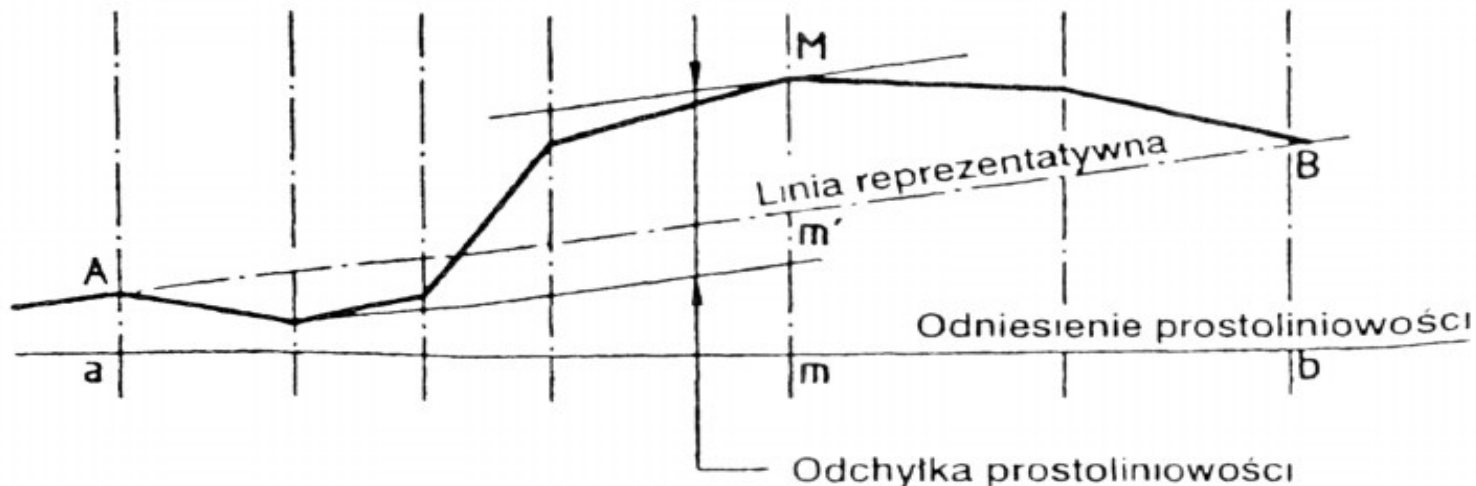
Suport wzdluzny

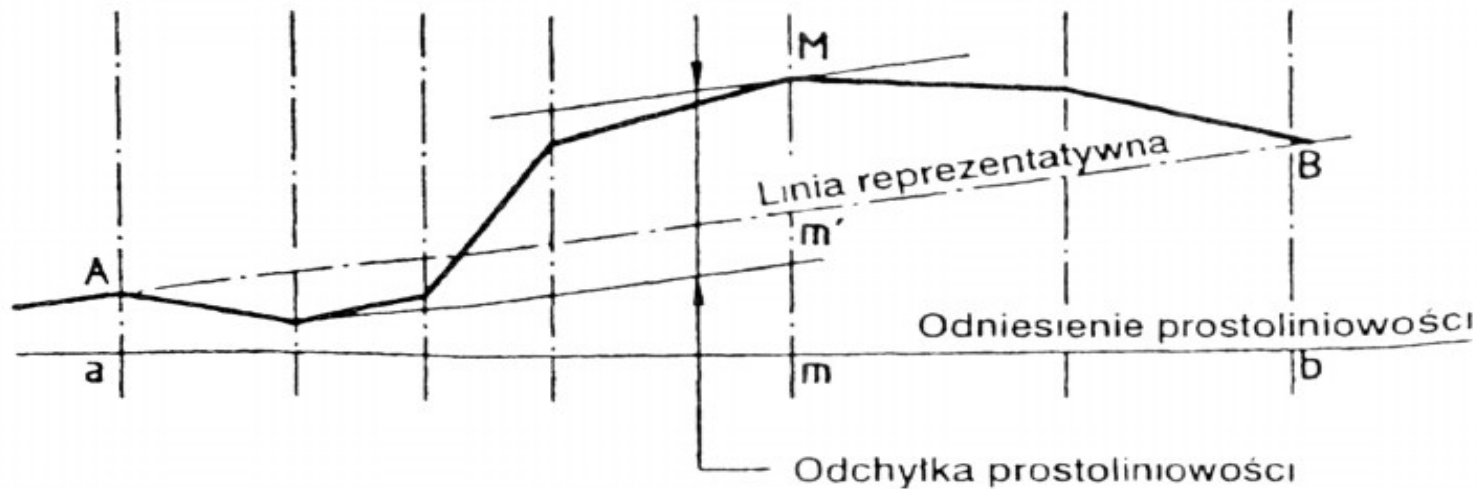


Przyrządem pomiarowym jest czujnik zegarowy. Jego końcówkę przystawia się do trzpienia pomiarowego osadzonego w kłach wrzeciona i konika. Pomiaru dokonuje się w wielu punktach przesuwając suport wzdłuż łoża.

Wyniki przygotowuje się w sposób pokazany na rysunku. W prostokątnym układzie współrzędnych rysuje się krzywą, w odpowiedniej skali nanosząc parametry:

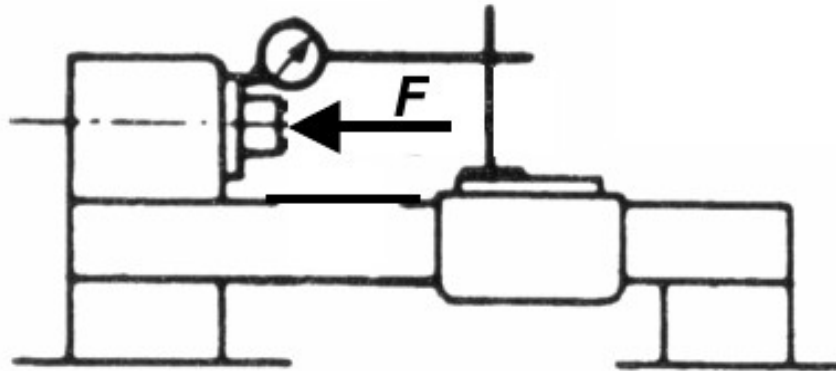
- na osi odciętych – kolejne miejsca wzdłuż łoża,
- na osi rzędnych – wskazania czujnika.





W myśl definicji ogólnej, odchyłka prostoliniowości zdefiniowana jest jako odległość między dwiema liniami prostymi równoległymi do linii reprezentatywnej i dotykającymi górnego i dolnego punktu wyznaczonej krzywej.

Wrzeciono - pomiar bicia czołowej powierzchni kołnierza

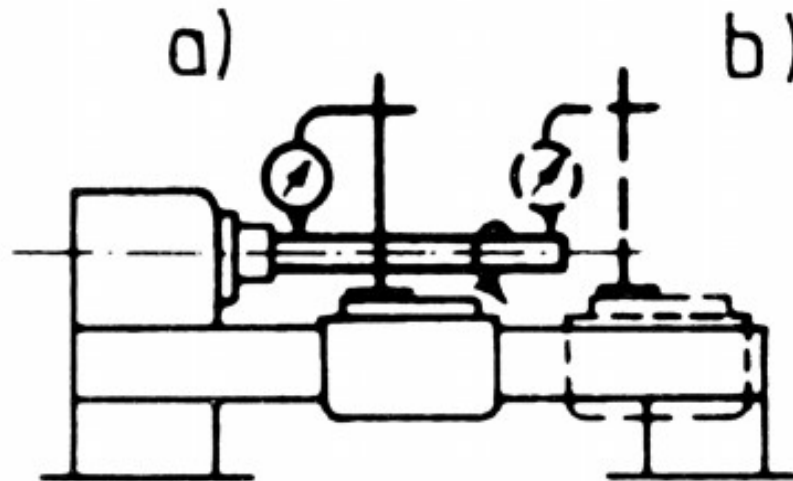


Przyrządem pomiarowym jest czujnik zegarowy.

Jego końcówkę przystawia się prostopadle do powierzchni badanej. Odczytu dokonuje się dokonując kilku obrotów wrzeciona.

Pomiar bicia promieniowego
Wewnętrznej powierzchni otworu wrzeciona:

- a) przy czole wrzeciona,
- b) w odległości równej $D_a/2$, ale nie większej niż 300mm.

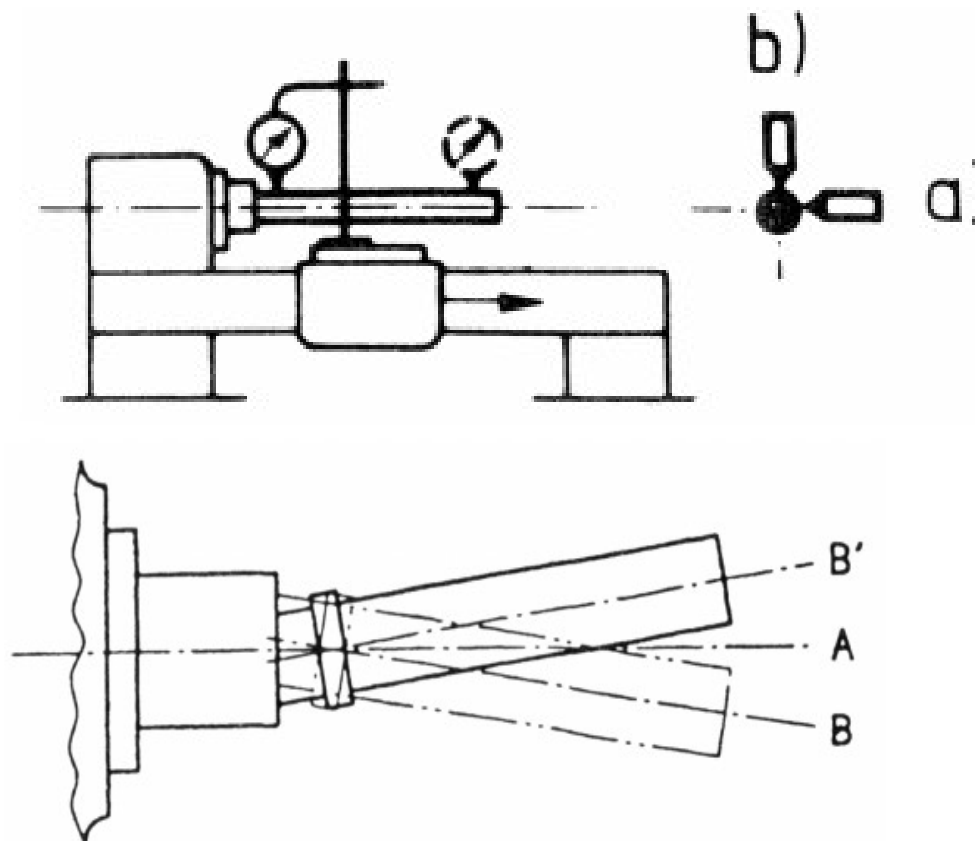


Przyrządem pomiarowym jest czujnik zegarowy. Jego końcówkę przystawia się do trzpienia pomiarowego osadzonego otworze wrzeciona. Odczytu dokonuje się dokonując kilku obrotów wrzeciona.

Odchyłki dopuszczalne [mm]	
$D_a \leq 800$	$800 < D_a \leq 1600$
a) 0,01 b) 0,02 na długości pomiarowej 300	a) 0,015 b) 0,05 na długości pomiarowej 500

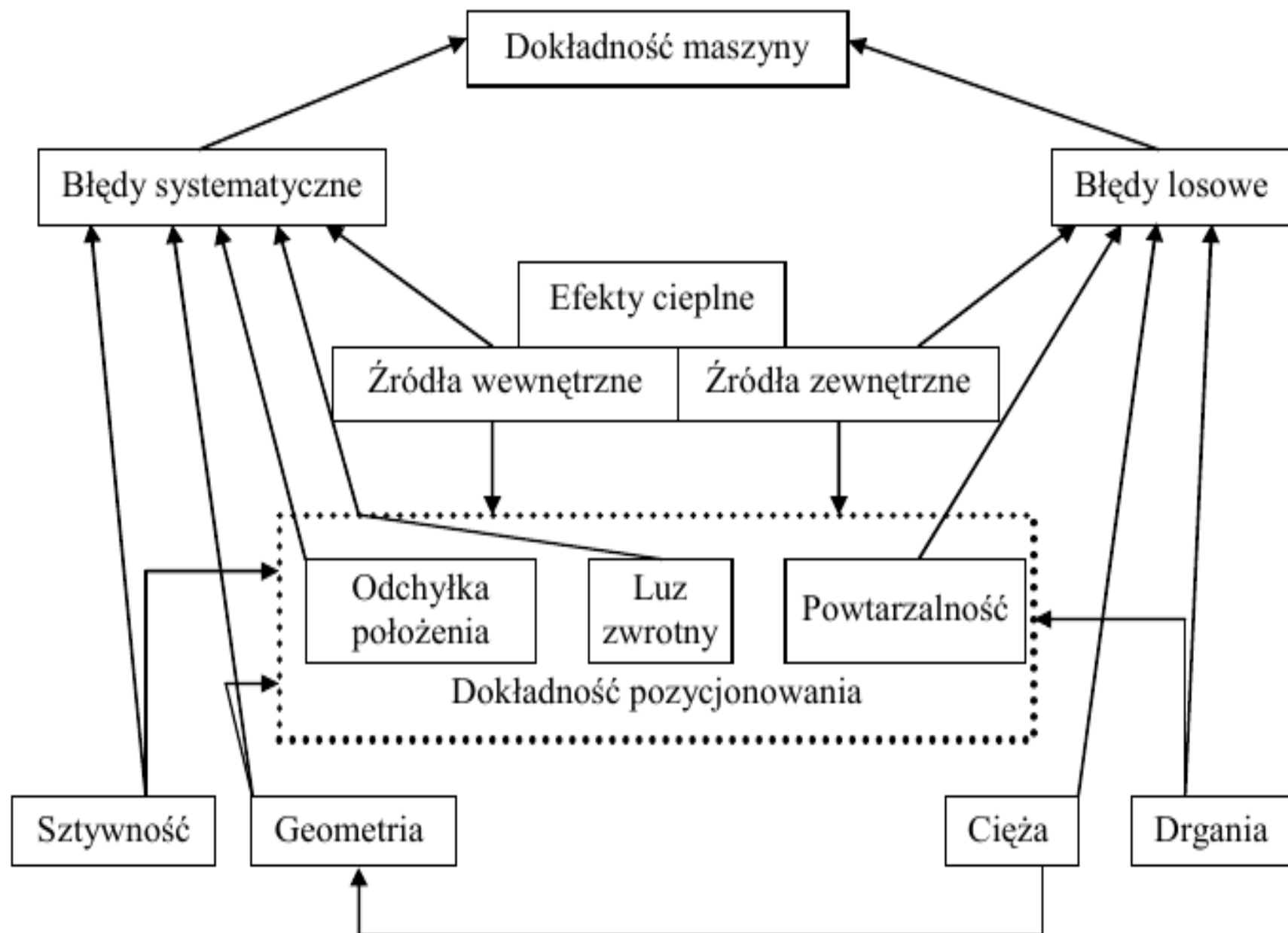
Sprawdzenie równoległości osi wrzeciona do przesuwu suportu wzdłużnego na długości równej $D_a/2$ lub maksymalnej równej 300 mm w płaszczyźnie:

- a) poziomej,
- b) pionowej.



Pomiar równoległości może być przeprowadzony w dowolnym położeniu kątowym wrzeciona, ale pomiar należy powtórzyć po obrocie wrzeciona o 180° . Odchyłkę równoległości w danej płaszczyźnie wyznacza się jako średnią arytmetyczną obu odczytów.

Odchyłki dopuszczalne [mm]	
$D_a \leq 800$	$800 < D_a \leq 1600$
a) 0,015/300 w kierunku do przodu	a) 0,03/500 w kierunku do przodu
b) 0,02/300 w kierunku do góry	b) 0,04/500 w kierunku do góry

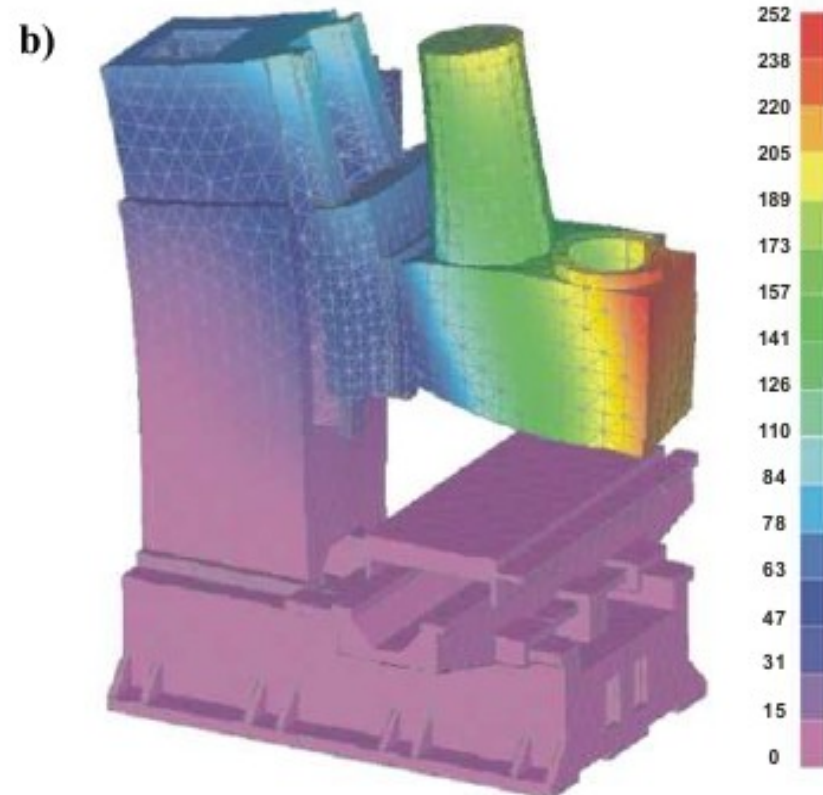
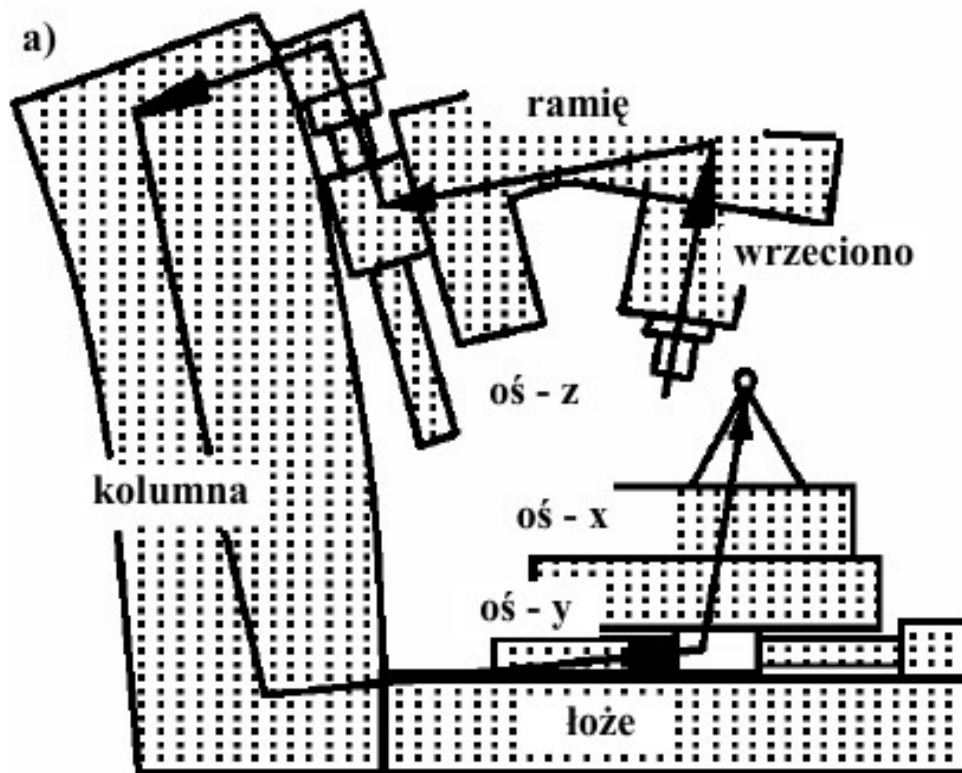


Błędy, które pojawiają się dopiero w trakcie pracy mogą być też związane z niedokładnością interpolatorów i działaniem napędów.

Serwonapędy pracują zazwyczaj w pętli sprzężenia zwrotnego i nigdy nie reagują na uchyb natychmiast. Zawsze występuje pewne opóźnienie czasowe, które odpowiada częstotliwości odświeżania wartości zadanych w regulatorze. Właściwe dobranie tej częstotliwości, dostosowane do prędkości, z jaką mogą przemieszczać się zespoły maszyny, jest istotne dla dokładności kinematycznej napędów.

Błędy powstające na skutek drgań są następstwem procesu obróbki i jego oddziaływania na obrabiarkę. Ich wielkość jest uzależniona od zastosowanych parametrów samego procesu, właściwości obrabiarki, a także prawidłowego działania par kinematycznych np. łożysk czy napędów obrotowych.

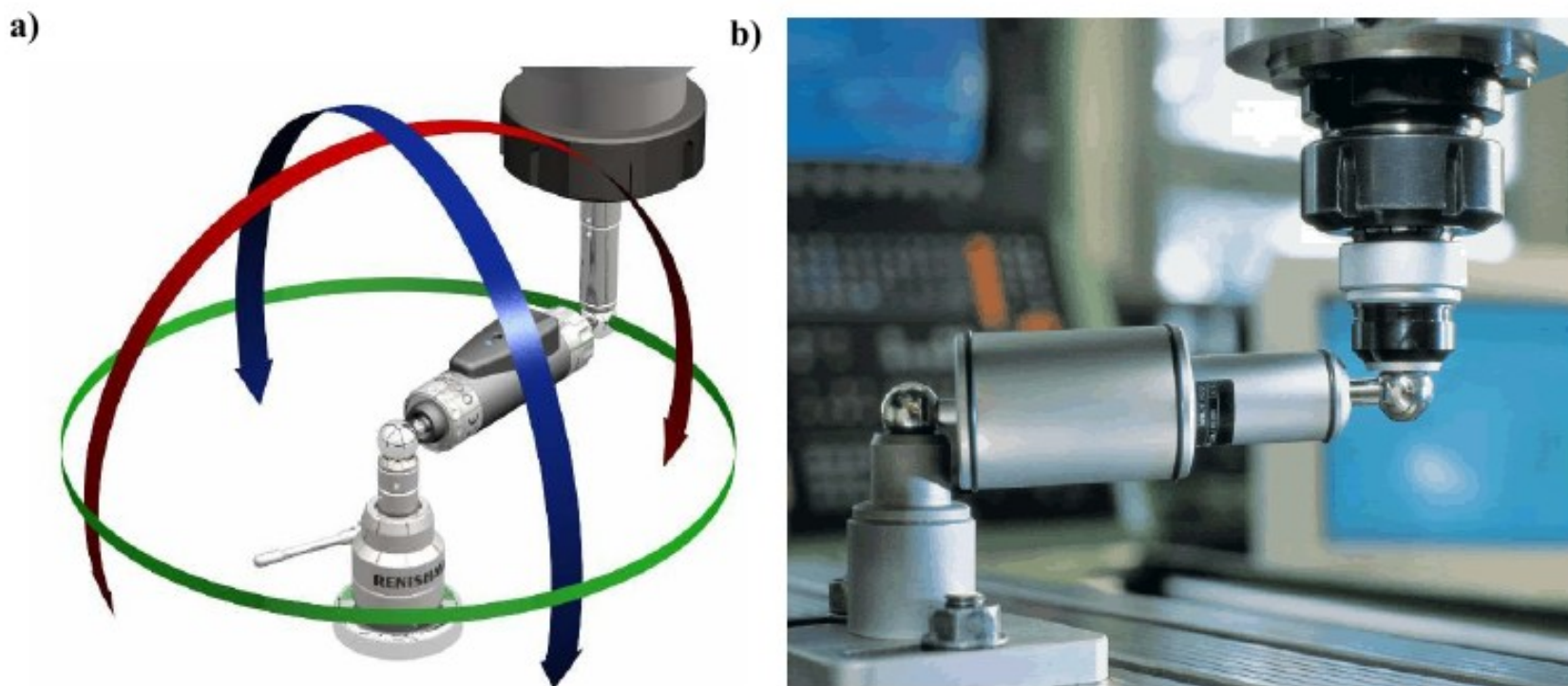
Eliminacja tych zakłóceń jest bardzo trudna. Konstruktorzy starają się więc ograniczyć je już w trakcie procesu projektowania obrabiarki, stosując coraz to nowsze i skuteczniejsze metody aktywnej redukcji drgań .



Wpływ odkształceń cieplnych na geometrię obrabiarki: a) charakter zmian geometrii, b) zmiany wygenerowane symulacyjnie (MES)

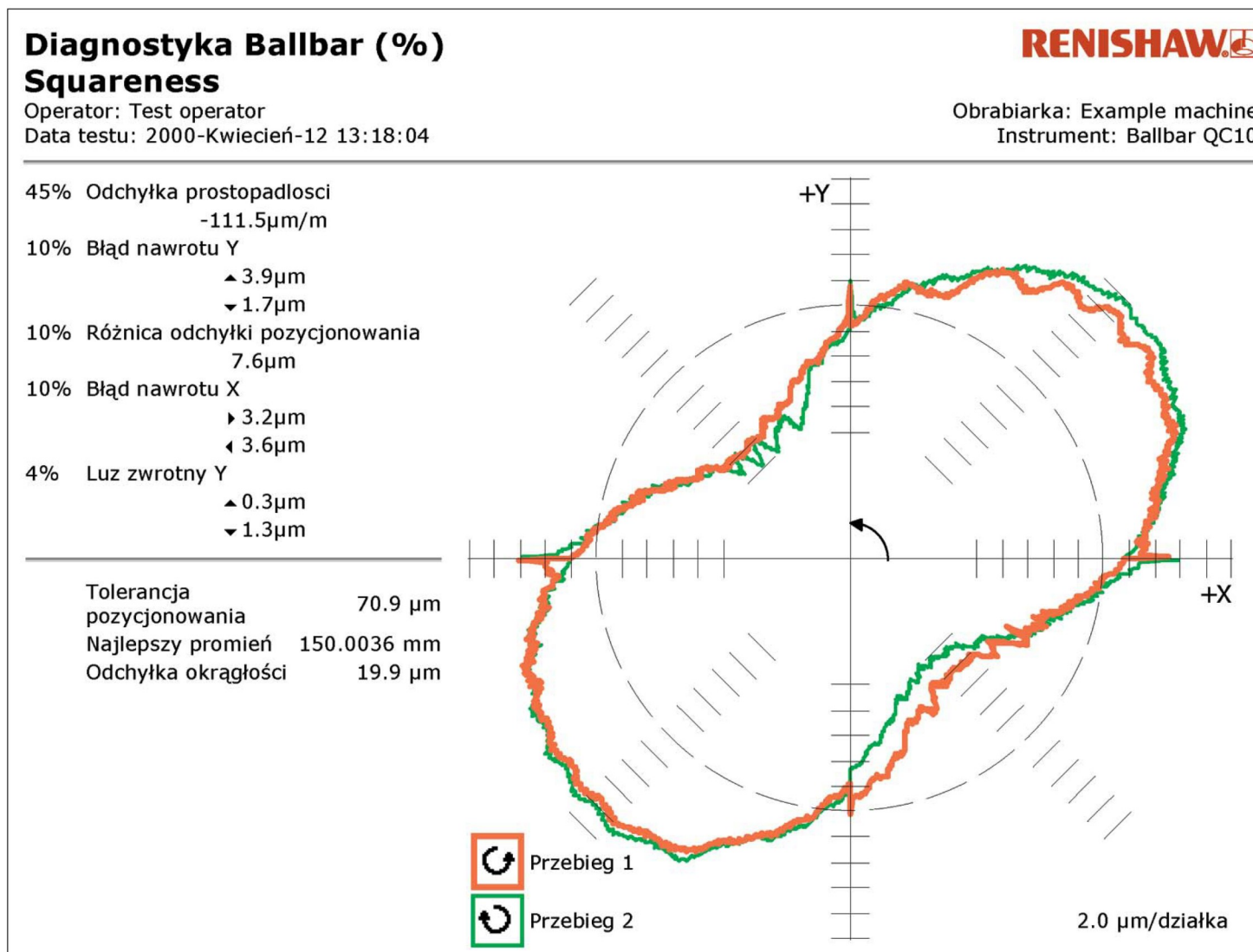
Obecnie w przemyśle obrabiarkowym jednym z najbardziej rozpowszechnionych narzędzi do testowania dokładności kształtowej 3-osiowych obrabiarek CNC są systemy typu Ballbar np. QC10, QC20 i DBB 110.

Test diagnostyczny pozwala zidentyfikować wiele błędów. Poza wspomnianą już odchyłką okrągłości pozwala również określić luz zwrotny, błąd nawrotu, drgania regularne i nieregularne, błąd nadążania, błąd skali, błąd prostopadłości osi.



Pomiar błędu obrabiarki za pomocą przyrządów Ballbar: a) QC20-W [55], b) DBB 110 [53]

Ballbar QC 20 charakteryzuje się dokładnością $\pm 1,25 \mu\text{m}$, rozdzielczością $0,1 \mu\text{m}$ i maksymalną szybkością próbkowania 1000 na sekundę. Zastosowanie urządzenia „bluetooth” umożliwia transmisję danych na odległość do 10 metrów.



Rys. 2. Przykładowy wynik testu

Istotne ograniczenie dla stosowania omawianej metody stanowi system ekspertowy opracowany przez producenta Ballbara. Opracowany on został tylko dla prostych 3-osiowych konstrukcji centrów frezarskich ze śrubami tocznymi i 3-osiowych centrów tokarskich.

W przypadku pozostałych maszyn, zarówno tradycyjnych, jak i o kinematyce równoległej, możliwe jest wykonanie tylko prostego testu interpolacji kołowej.

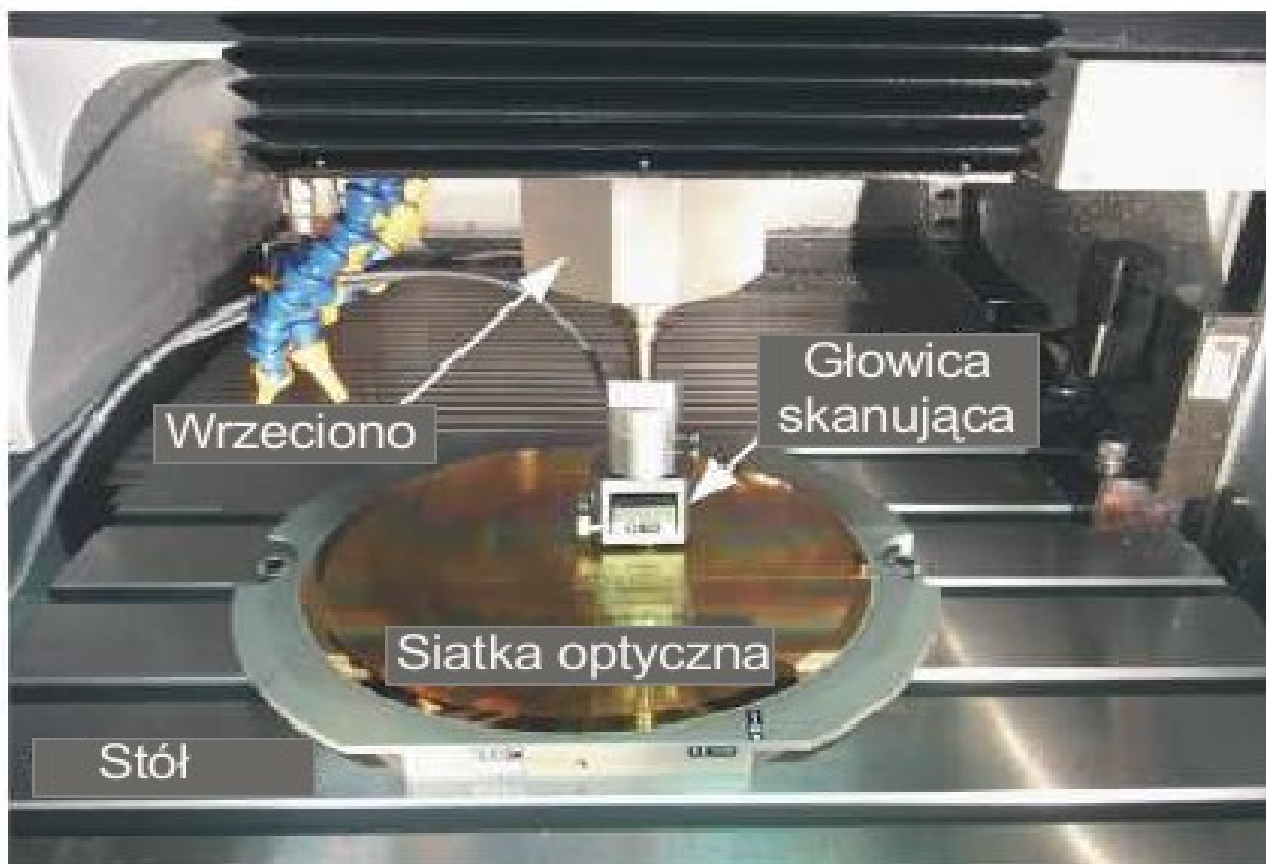
Do innych wad tego urządzenia zaliczyć trzeba to, że:

- wykorzystując Ballbar pomiary przeprowadza się tylko w wybranej części przestrzeni roboczej obrabiarki,
- pomimo tego, że producent oferuje różne długości pręta dwukulowego, co daje możliwość dokonywania testów na okręgu o promieniu w zakresie od 50 do 1350 mm to i tak nie da się otrzymać mapy błędów w całej przestrzeni roboczej,
- ścieżka pomiaru musi mieć zawsze kształt koła lub jego fragmentu.

METODA SIATEK OPTYCZNYCH

Metoda siatek optycznych i urządzenie KGM (Cross Grid encoder), rozwijane obecnie przez firmę Heidenhain, przeznaczone jest do oceny statycznych i dynamicznych błędów obrabiarki.

Składa się z laserowej głowicy skanującej mocowanej do wrzeciona i dwóch szklanych płyt z naniesionymi siatkami tytanowymi, odbijającymi i tłumiącymi światło – mocowanych na stole obrabiarki. Obie siatki ustawione są względem siebie wprostokątne (tłumią się).



System KGM podczas pomiarów dokładności precyzyjnej obrabiarki

Transformacja wyników z KGM na składowe błędy przestrzennego wymaga odpowiednich algorytmów przeliczeniowych. Algorytmy takie pozwalają na wyznaczenie 21 składowych błędów przestrzennego obrabiarki 3-osiowej.

Oparte są one na kinematycznym modelu błędów i wykorzystują metodę HTM (Homogenous Transformation Matrix).

BEZPOŚREDNIE METODY WYZNACZANIA BŁĘDU PRZESTRZENNEGO

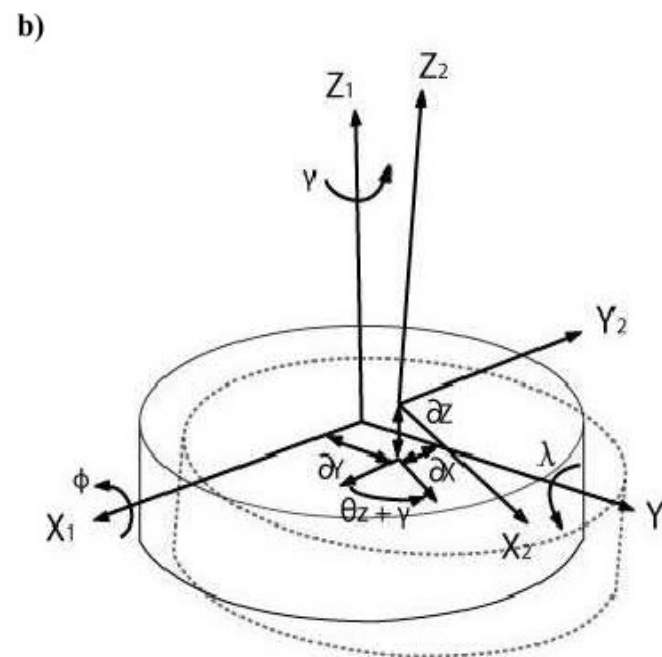
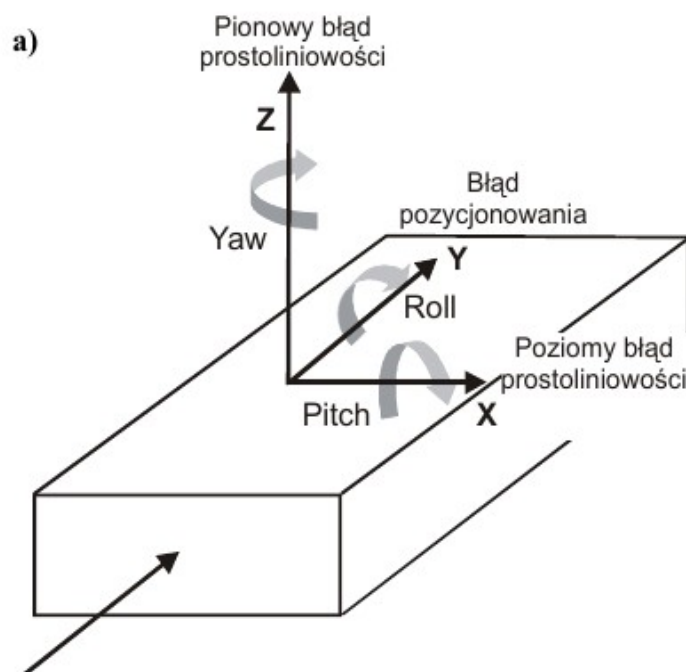
Błąd przestrzenny jest najbardziej wiarygodnym parametrem opisującym dokładność obrabiarki. Jego znajomość w całej przestrzeni roboczej pozwala na zwiększenie dokładności wykonywanych części na drodze kompensacji błędów, realizowanej przez układ sterowania CNC.

Rodzaje i liczba błędów składająca się na błąd przestrzenny zależy od konstrukcji obrabiarki tzn. od liczby osi sterowalnych liniowych i obrotowych. Możliwe błędy, jakie mogą wystąpić w osiach sterowalnych obrabiarek pokazano na rys. Oprócz nich występują jeszcze błędy związane z oddziaływaniem błędów w jednej osi na błędy w innej osi.

Kąty:
przechył,
nachylenie,
odchylenie

Ang.Roll,
Yaw

Pitch,



Błędy w osiach sterowanych a) osie liniowe, b) osie obrotowe

Dla obrabiarki 3-osiowej jest zatem 21 błędów, z czego 3 to błędy wzajemnej prostopadłości trzech osi. W obrabiarkach o większej liczbie osi składowych błędu przestrzennego może być znacznie więcej.

Dla maszyn 5-osiowych o dwóch osiach obrotowych liczba składowych wynosi już 43.

Zgodnie z konwencjonalną definicją przestrzenny błąd geometryczny w przestrzeni 3D, wyznaczany interferometrem laserowym 1D, jest średnią kwadratową z trzech błędów pozycjonowania w osiach x, y, z.

Zminimalizowanie tak rozumianego błędu przestrzennego nawet do zera nie gwarantuje jednak oczekiwanej dokładności obrabiarki, gdyż definicja ta nie uwzględnia wszystkich składników błędu.

Identyfikacja interferometrem 1D wszystkich 21 składowych, dla punktów rozmieszczonych w całej przestrzeni roboczej, jest nierealna ze względów czasowych i z powodu oddziaływań cieplnych środowiska w długim przedziale czasowym. Rozwój narzędzi i metod pomiarowych doprowadził do modyfikacji definicji błędu przestrzennego.

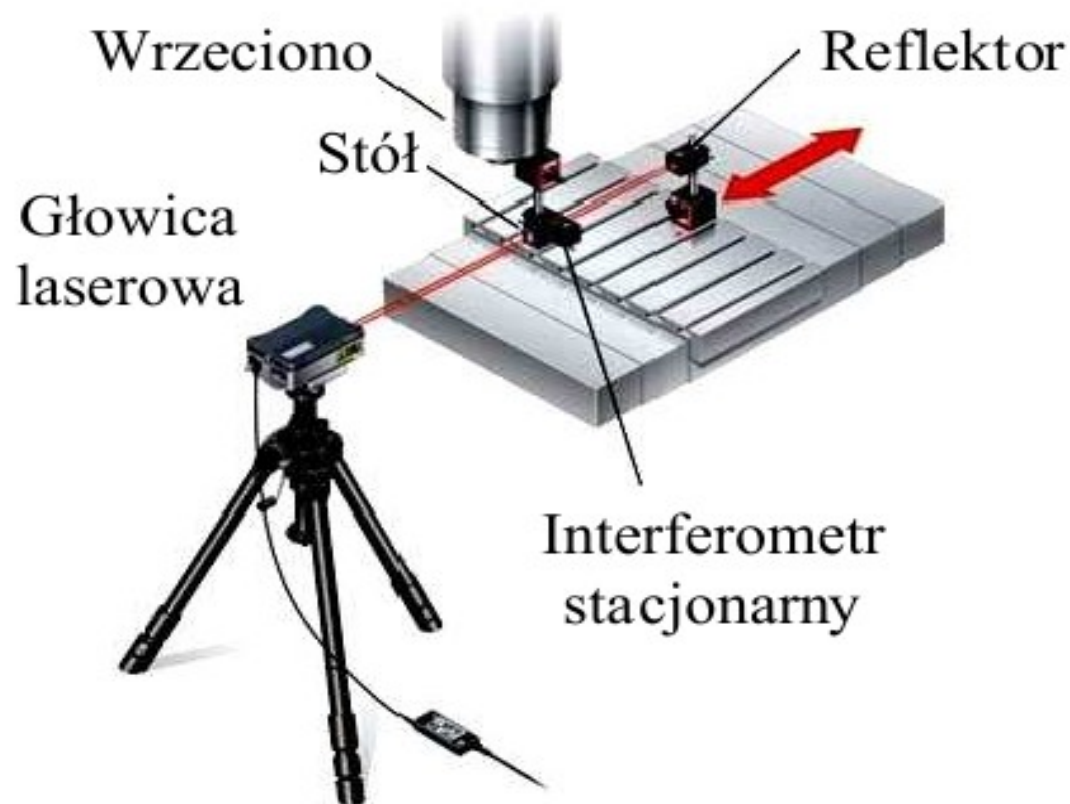
Od roku 2000, zgodnie ze standardem ASME B5.54 i ISO 230-6, obejmuje on oprócz błędów pozycjonowania również poziome i pionowe błędy prostoliniowości oraz błędy kątowe (Roll, Pitch, Yaw).

Standardom tym, dotyczącym obrabiarek 3-osiowych, mogą sprostać urządzenia realizujące pomiary przemieszczeń wzdłuż czterech przekątnych przestrzeni roboczej np. metodą wektorową.

INTERFEROMETR LASEROWY JEDNOOSIOWY

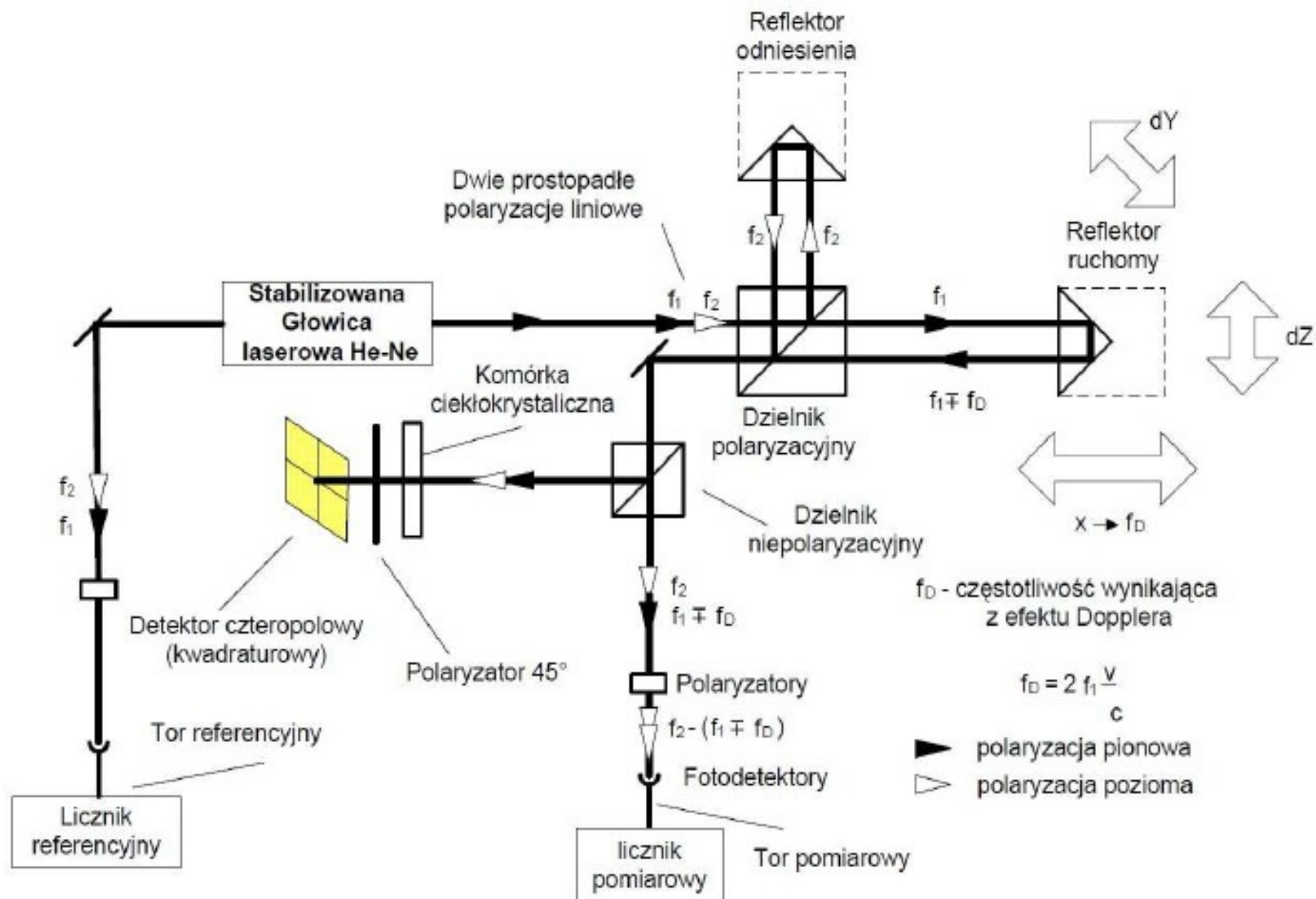
Jednym z najdokładniejszych sposobów oceny dokładności obrabiarki jest opracowanie mapy błędów dla całej przestrzeni roboczej maszyny. Wymaga to przeprowadzenia pomiarów dokładnościowych we wszystkich osiach ruchu obrabiarki.

Ze względu na dużą dokładność, do pomiaru przemieszczeń i kątów wykorzystywany jest interferometr las



Pomiar dokładności pozycjonowania stołu frezarki przy użyciu interferometru laserowego

INTERFEROMETR LASEROWY JEDNOOSIOWY 3D



Schemat zliczania impulsów metodą heterodynową

Wykonując interferometryczne pomiary liniowe np. w osi x, jednocześnie mierzone są w zakresie $\pm 1\text{mm}$ odchylenia w osiach y i z, z zastosowaniem komórki ciekłokrystalicznej i detektora czteropolowego. Dzięki temu w każdym punkcie pomiarowym rejestrowany jest błąd pozycjonowania wzdłuż mierzonej osi i dwa błędy jej prostoliniowości (poziomej i pionowej).

Dokładność pomiaru wzdłuż mierzonej osi jest równa dokładności interferometru, a w pozostałych dwóch osiach jest ona zwykle nieco mniejsza.

W efekcie metoda ta pozwala na znaczne skrócenie czasu potrzebnego do oceny dokładności badanej maszyny.

Równocześnie korzystając z dołączonego oprogramowania otrzymuje się tabele z wartościami kompensacyjnymi dla obrabiarek wyposażonych w takie sterowniki jak np. Siemens lub Heidenhain.

Zmiana osi pomiarowej wymaga przestawienia optyki lasera. Takie rozwiązanie jest bardzo mało wydajne i czasochłonne. Związane jest to z tym, że wszystkie pomiary należy wykonać trzykrotnie, dla każdej osi oddzielnie, a każda zmiana położenia lasera lub optyki wymaga przeprowadzenia kalibracji całego układu.

Powoduje to, że do określenia 21-parametrowego modelu błędów geometrycznych potrzeba kilku dni dla trzyosiowej obrabiarki.

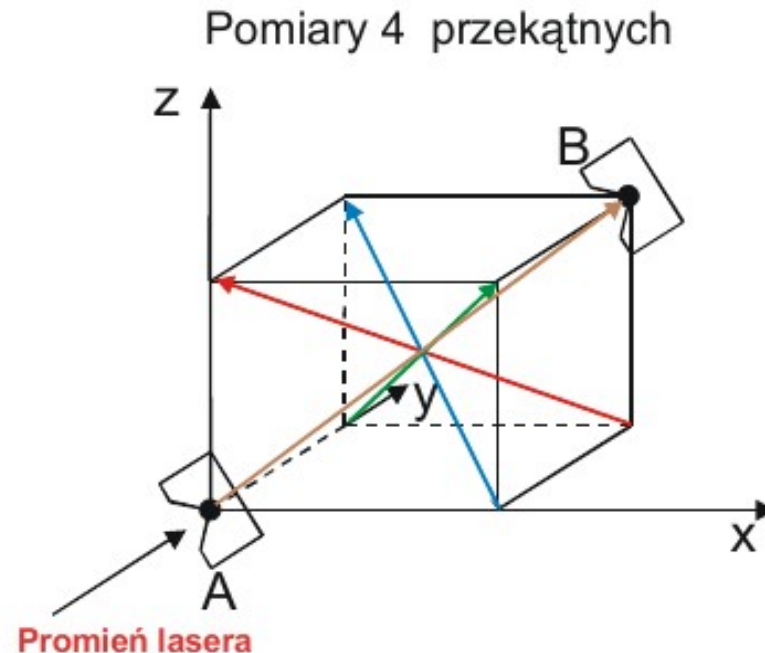
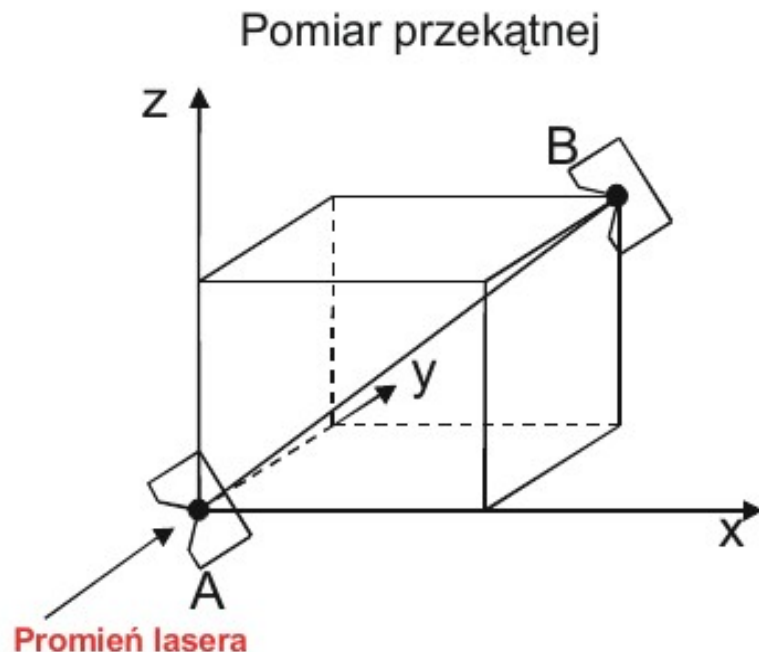
Zwykle nie ma możliwości wyłączenia obrabiarki na tak długi okres czasu.

Z tego powodu w praktyce wyznacza się zazwyczaj tylko najważniejsze składniki błędu, co pozwala skrócić czas przestoju obrabiarki, i uzyskać jeszcze założoną dokładność wykonywanych przedmiotów. Jest to jednak rozwiązanie połowiczne, które nie pozwala w pełni wykorzystać danej maszyny.

INTERFEROMETR LASEROWY– METODA WEKTOROWA

Pomiary wszystkich składowych błędu przestrzennego, omówionymi metodami laserowymi 1D i 3D, są technicznie trudne i bardzo pracochłonne.

Dla ich uproszczenia opracowana została propozycja analitycznego wyznaczania większości składowych, na podstawie pomiaru laserem 1D przekątnych prostopadłościanu, opisującego przestrzeń roboczą obrabiarki. Do jednoznacznego wyznaczenia tych składowych potrzebne są pomiary dla wszystkich czterech przekątnych.



Pomiary
przekątnej

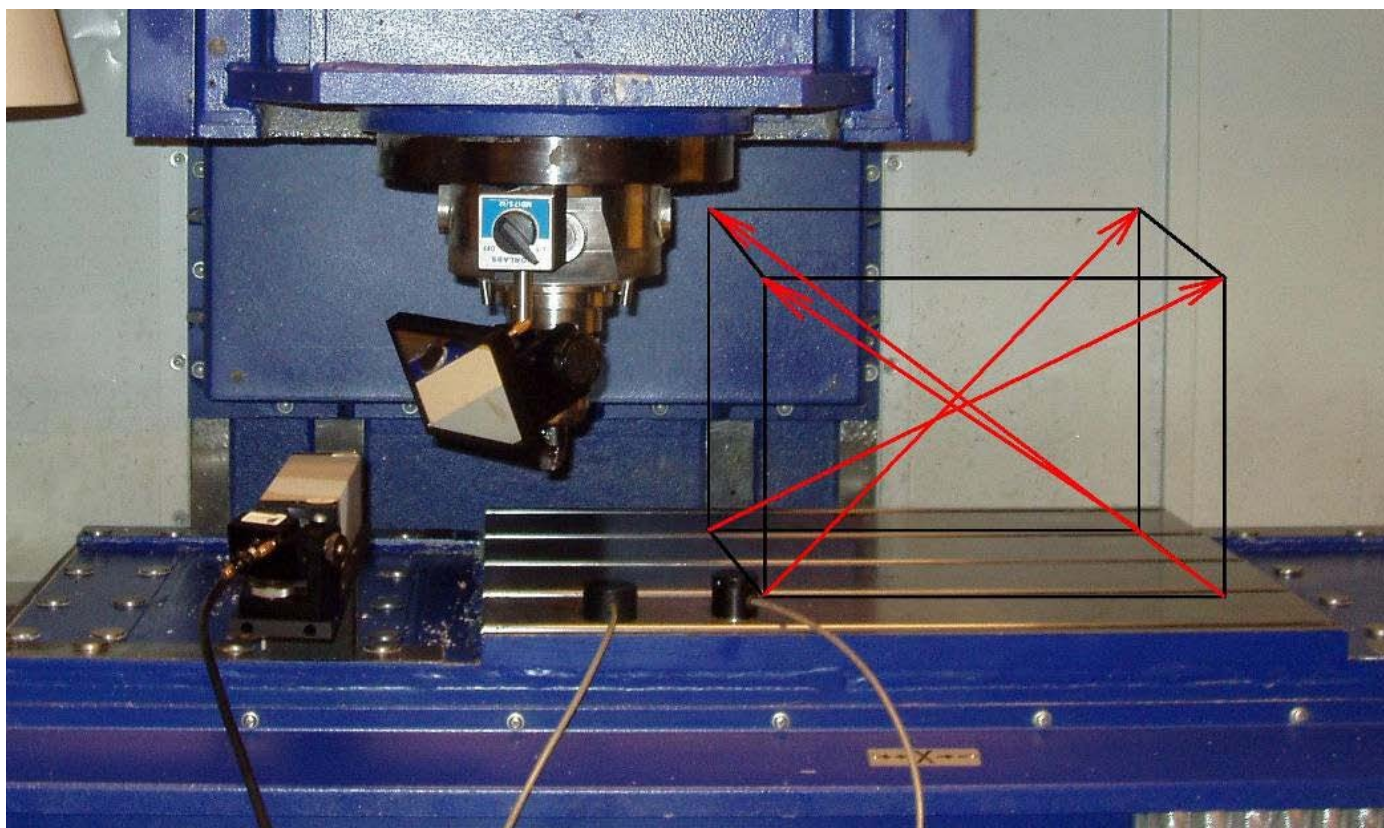
Porównując tę metodę pomiaru do bezpośredniego pomiaru przekątnych, to metoda wektorowa pozwala na uzyskanie trzy razy większej liczby danych. Wynika to z sekwencyjności ruchów w metodzie wektorowej, dzięki której możliwe jest gromadzenie wyników pomiaru przemieszczenia dla wszystkich pośrednich położeń lustra.

Po zakończeniu pomiaru, dla wszystkich czterech przekątnych, uzyskuje się dwanaście zestawów danych, z których można wyznaczyć 12 błędów:

Pozycjonowania (3), prostoliniowości poziomej (3) i pionowej (3) oraz prostopadłości osi (3). Wyniki mogą być przedstawiane w tabelach lub w postaci wykresów.

Zastosowanie metody wektorowej w obrabiarce lub maszynie współrzędnościowej 3D o przestrzeni roboczej do 1 m pozwala przeprowadzić pomiary wszystkich czterech przekątnych w czasie 2 – 4 godzin.

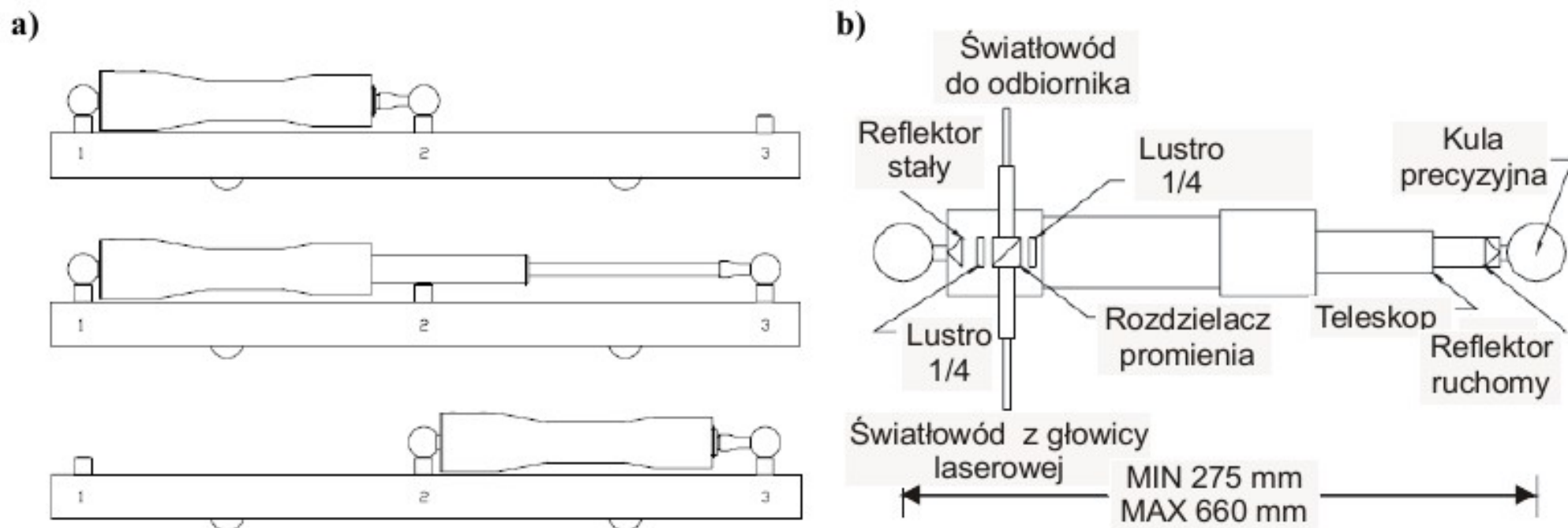
Metoda ta oraz narzędzia programowe do wyznaczania poprawek dla celów kompensacji błędów obrabiarki rozwijane są m.in. przez Optodyne Inc. Dla niektórych sterowników (np. Fanuc, Siemens, Giddings and Lewis itp.) tabele kompensacyjne są generowane automatycznie, a po jej zastosowaniu otrzymuje się kilkukrotną poprawę dokładności. Ponadto metoda ta jest w pełni zgodna z normami ASME B5.54 oraz PN-ISO 230-2. Cały system pomiarowy jest przenośny, co umożliwia zastosowanie go na wielu różnych maszynach.



Parts	Un-compensated	Compensated	Calculated values
X-axis direction, Inches	3.7999	3.8001	3.8000
Y-axis direction, Inches	3.7995	3.7997	3.8000
+ 45 degrees direction, Inches	3.7409	3.7414	3.7416
- 45 degrees direction, Inches	3.7424	3.7417	3.7416

LASEROWE PRĘTY KULOWE LBB

LBB (Laser Ball Bar) jest urządzeniem przeznaczonym do oceny dokładności obrabiarek przez bezpośrednie pomiary położenia narzędzia w przestrzeni roboczej w stosunku do powierzchni stołu. Tworzy je dwustopniowa tuleja teleskopowa z precyzyjnymi kulami mocowanymi na obu jej końcach i układem optycznym pozwalającym na laserowy pomiar odległości obu kul. Głowica laserowa łączona jest z urządzeniem za pomocą światłowodów.



Laserowy pręt kulowy (LBB): a) pozycje kalibrowane, b) układ optyczny

LASEROWE PRĘTY KULOWE LBB

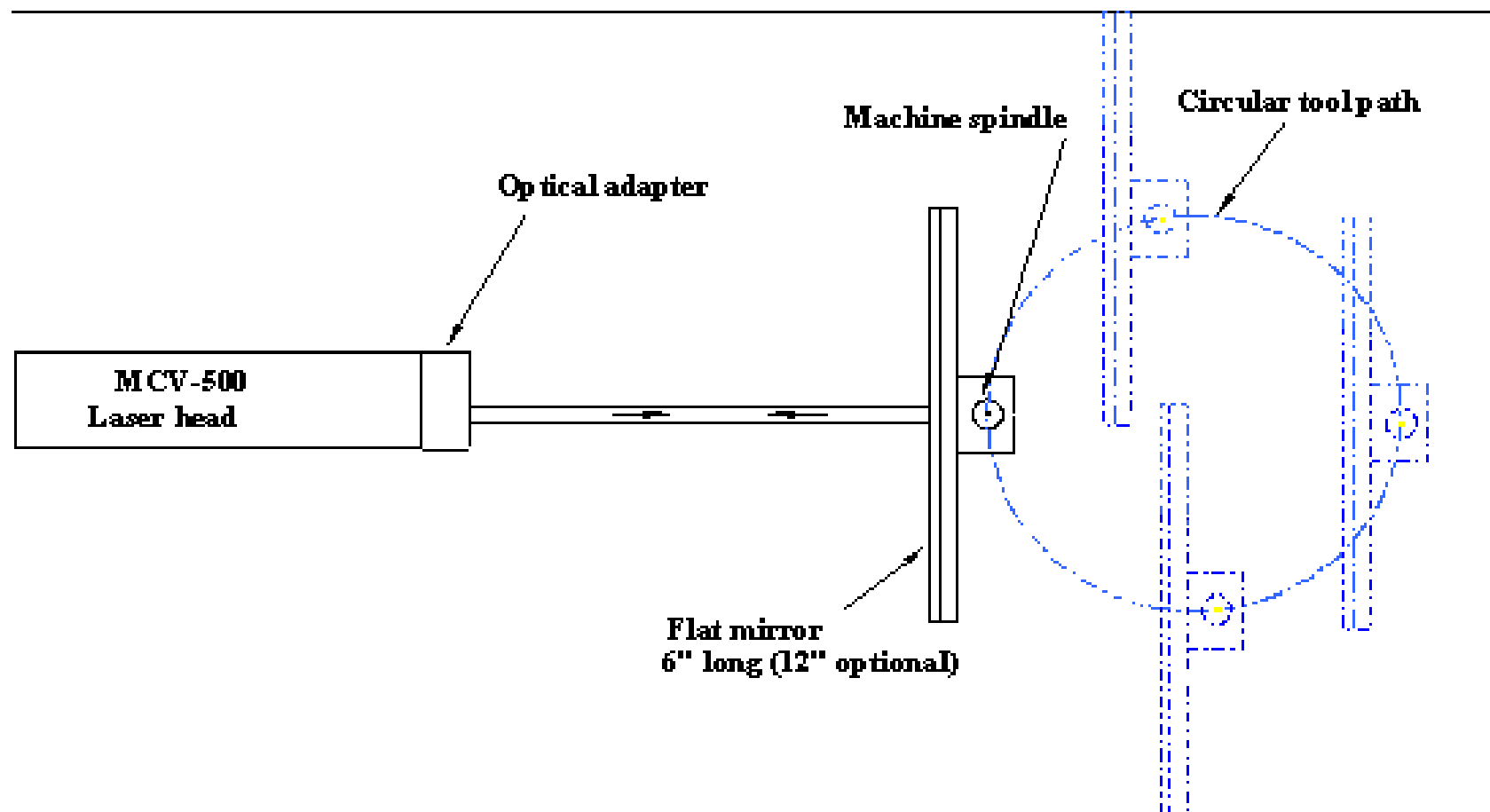


FIG. 1 SCHEMATIC OF LASER CIRCULAR TEST

LASEROWE PRĘTY KULOWE LBB



Pomiary odległości pomiędzy punktem na stole obrabiarki a punktem na końcówce wrzeciona nie pozwalają na dokładne wyznaczenie współrzędnych położenia wrzeciona w przestrzeni roboczej. Na podstawie takich pomiarów można tylko wyznaczyć błędy interpolacji kołowej oraz błędy prostopadłości między osiami aktywnymi podczas testu w przestrzeni.

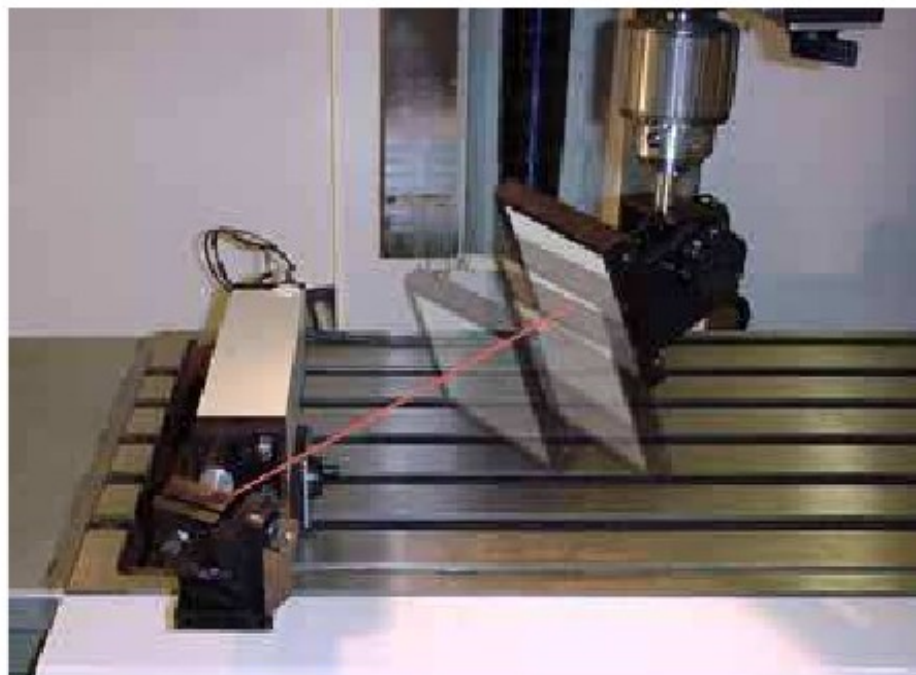
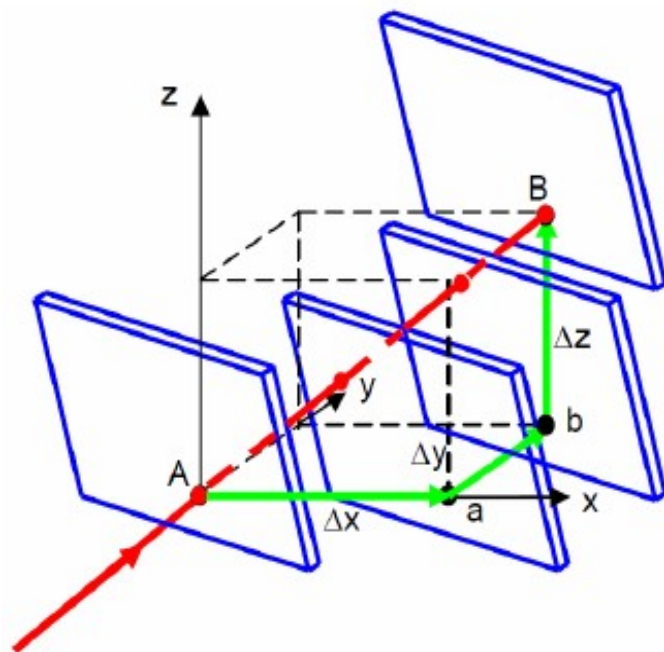
Z tego powodu opracowana została procedura trilateralna, polegająca na sekwencyjnie wykonywanych pomiarach urządzeniem LBB z trzech baz, rozmieszczonych na powierzchni stołu.

Dzięki kalibrowanym pozycjom LBB wzajemne odległości trzech baz 1-2, 1-3, i 2-3 są znane, co pozwala, po zmierzeniu trzech krawędzi L4, L5, L6 powstałego w ten sposób czworościanu, wyznaczyć współrzędne jego wierzchołka.

Do wyznaczenia aktualnych współrzędnych przestrzennych wierzchołka x, y, z i oceny niepewności pomiarów wykorzystuje się zależności geometryczne:

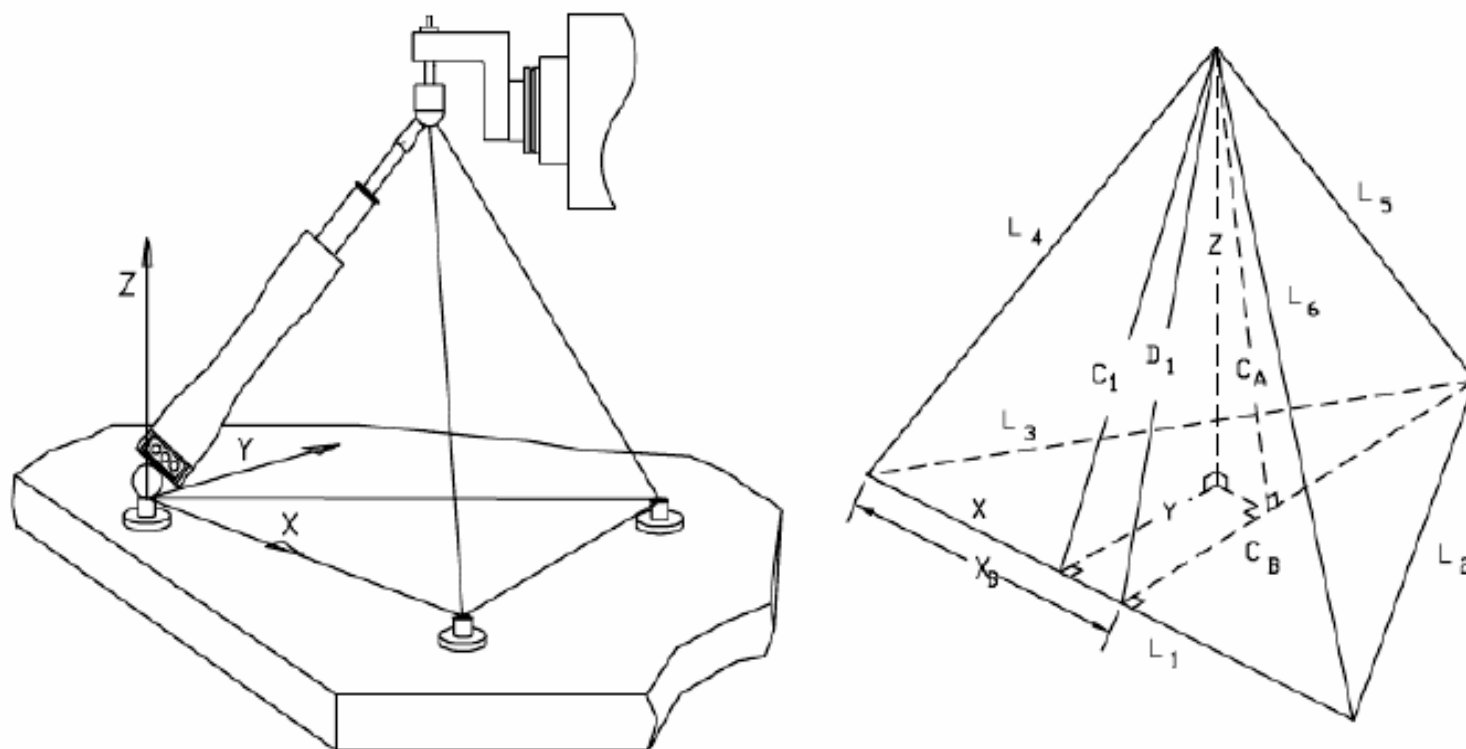
$$\begin{aligned}
 x &= \frac{L_4^2 - L_3^2 + L_1^2}{2L_1} & c_b &= \sqrt{L_3^2 - x_b^2} \\
 y &= \frac{d_1^2 - L_6^2 + c_b^2}{2c_b} & \text{gdzie: } x_b &= \frac{L_3^2 - L_2^2 + L_1^2}{2L_1} \\
 z &= \sqrt{c_1^2 - y^2} & d_1 &= \sqrt{c_1^2 + (x_b - x)^2} \\
 & & c_1 &= \sqrt{L_4^2 - x^2}
 \end{aligned}$$

Do zrealizowania procedury pomiaru przekątnej laserem 1D niezbędne jest zastosowanie odbłyśnika w postaci lustra płaskiego o możliwie dużych wymiarach. Pomiar przekątnej w tej metodzie polega bowiem na sekwencyjnym przesuwaniu lustra względem promienia laserowego, wyznaczającego mierzoną przekątną, w kierunkach x, y, z o wartość $\Delta x, \Delta y, \Delta z$. Zaletą jest to, że jednocześnie mierzone są błędy pozycjonowania i błędy prostoliniowości.



Wektorowa metoda pomiaru

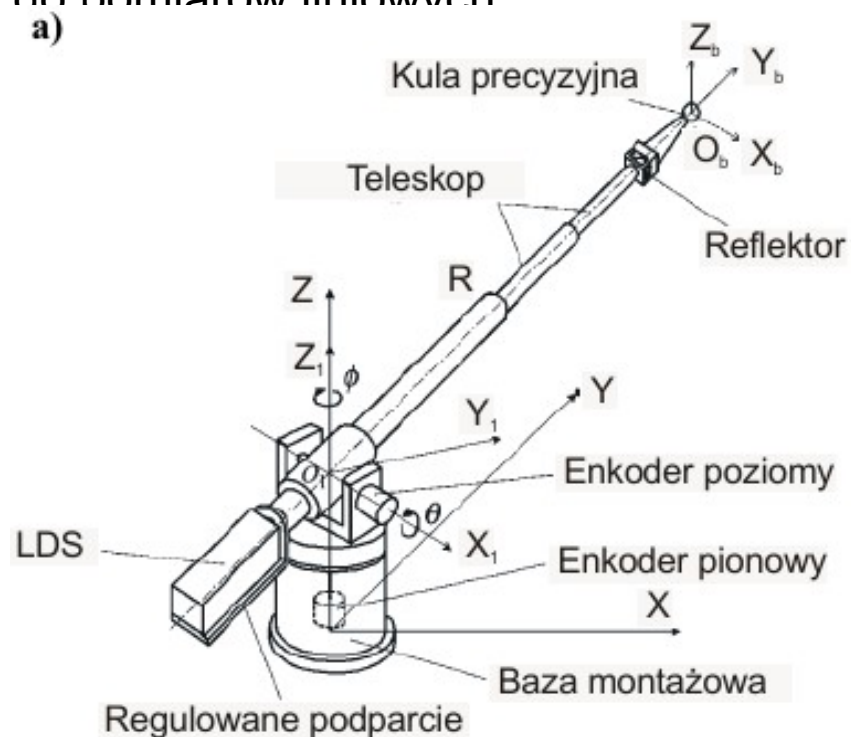
Dzięki trilateralnej procedurze, na podstawie pomiarów położenia wrzeciona, wykonywanych z użyciem LBB, można wyznaczyć 21 składowych błędów przestrzennego, dla każdej z trzech liniowych osi sterowalnych.



Schemat układu współrzędnych i konfiguracja procedury trilateralnej]

Uzupełnienie laserowych prętów kulowych o możliwość pomiaru dwóch kątów obrotu pręta pozwoliło uzyskać przyrząd nazywany 3D LBB, który rzeczywiście pozwala mierzyć położenie końcówki wrzeciona bezpośrednio i w czasie rzeczywistym. W przykładzie przedstawionym na rys. 13 zastosowano dwa laserowe enkodery obrotowe do pomiaru kąta

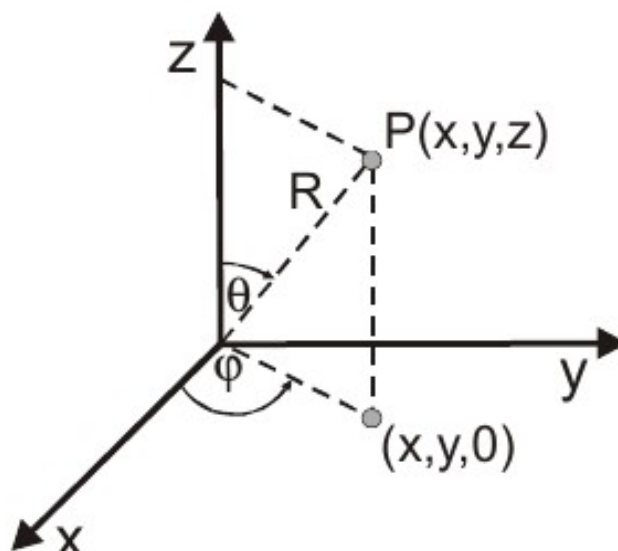
obrotu względem osi pionowej z i poziomej x i pokazano precyzyjny interferometr laserowy do pomiarów liniowych



Laserowy pręt kulowy 3D (3D LBB): a) konstrukcja, b) widok urządzenia w czasie pomiaru [7]

Trzy czujniki, jeden do pomiarów liniowych i dwa do pomiarów kąta obrotu, rejestrujące położenie pręta w układzie współrzędnych sferycznych, pozwalają na łatwą transformację wyników pomiaru do kartezjańskiego układu współrzędnych (rys. 14). Do wyznaczenia położenia punktu we współrzędnych sferycznych niezbędne jest określenie

długości promienia R i dwóch kątów obrotu θ i ϕ



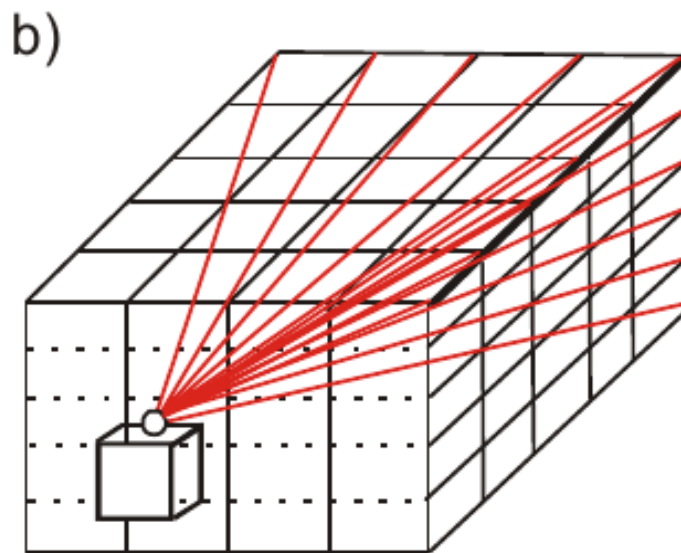
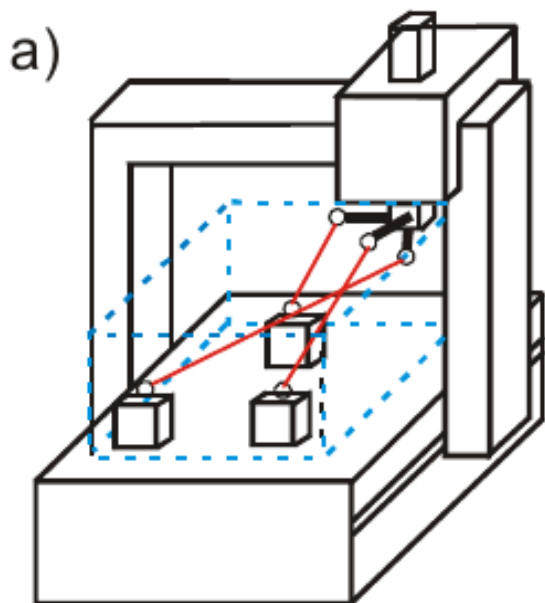
Transformacja wyników do kartezjańskiego układu współrzędnych

Głównym ograniczeniem stosowania urządzeń LBB i 3D LBB jest minimalna i maksymalna długość pręta teleskopowego. Jednoznacznie wyznaczają one część martwą przestrzeni roboczej, w której pomiary nie mogą być wykonywane i maksymalną wielkość przestrzeni roboczej, w której wykonywane są testy pomiarowe. Ograniczeń tych nie mają już najnowsze technologicznie śledzące systemy laserowe.

LASER ŚLEDZĄCY

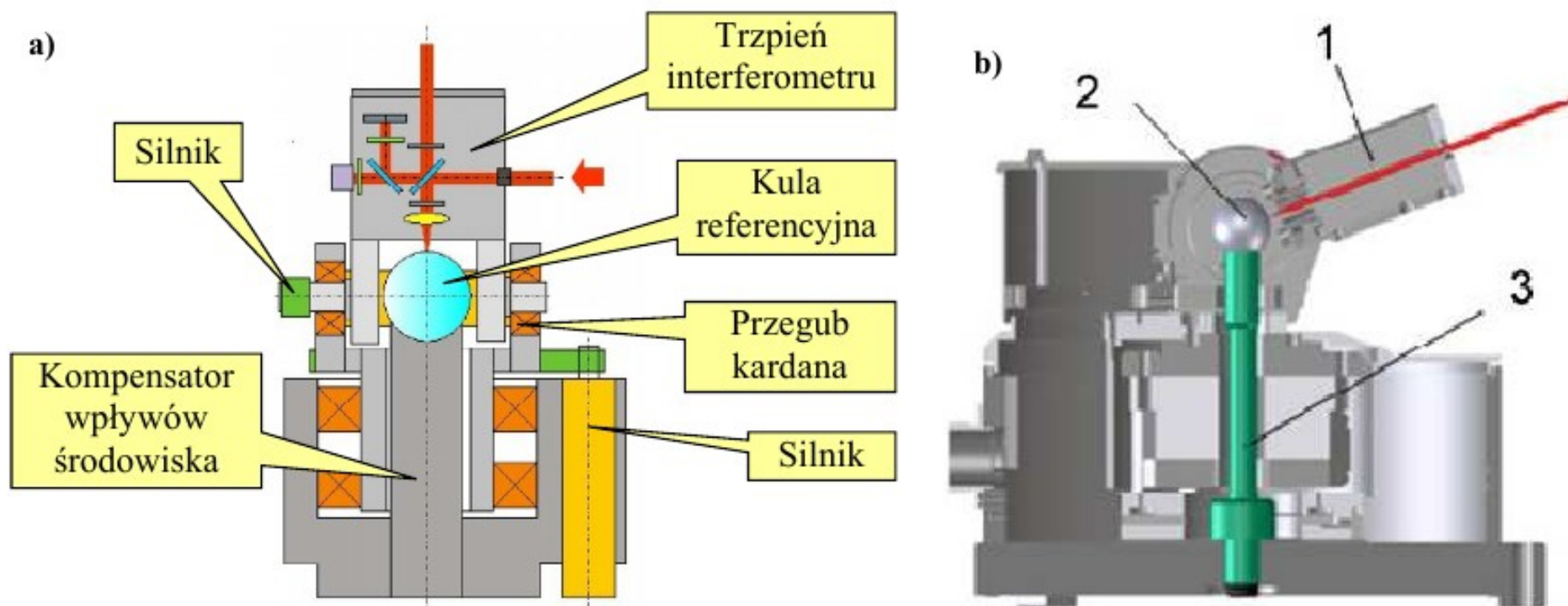
Techniczne zrealizowanie koncepcji lasera śledzącego umożliwiło nowe podejście do odwzorowania błędów geometrycznych obrabiarki. Polega ono na interferometrycznych pomiarach przemieszczeń pomiędzy punktem referencyjnym związanym z bazą obrabiarki i ruchomym punktem (celem) związanym z głowicą lub oprawką narzędziową, bez ograniczeń typowych dla przyrządów LBB i 3D LBB.

Dla każdego z trzech położzeń lasera obrabiarka realizuje ruchy wrzeciennika tak, aby wypełnić możliwie dużą objętość przestrzeni roboczej. W każdym punkcie siatki przestrzennej ruchy osi są zatrzymywane i rejestrowane jest przemieszczenie reflektora względem nieruchomej kuli referencyjnej. Błędy obrabiarki są zdefiniowane jako różnice przemieszczeń nominalnych i zmierzonych.



Laser śledzący w co najmniej trzech pozycjach na stole obrabiarki: a) pozycje lasera, b) siatka przestrzenna

Interferometr dzięki sterowanym silnikom automatycznie śledzi położenie ruchomego reflektora, umożliwiając pomiar odległości w dowolnej chwili. W tej konstrukcji trzpień interferometru porusza się w przegubie kardana, wewnątrz którego zamocowana jest precyzyjna kula stanowiąca stacjonarny punkt referencyjny i służąca jednocześnie, jako odniesienie dla interferometru. Rolę reflektora, w którym obszar pomiarowy jest ograniczony do $\pm 60^\circ$, spełnia układ optyczny „cats-eye”. Rozdzielczość wynosi $0,001 \mu\text{m}$, a zasięg 15 metrów.



Śledzący interferometr laserowy: a) struktura, b) (1) interferometr śledzący, (2) stacjonarna kula referencyjna, (3) niezmienny cieplnie pręt podpierający kulę referencyjną

LASER ŚLEDZĄCY Z AKTYWNYM CELEM

W wyniku realizacji zintegrowanego projektu pt. „Volumetric Accuracy for Large Machine Tool” realizowanego przez Automated Precision, Boeing, Siemens, Mag Cincinnati i Automated Precision Inc. opracowana została metodyka pozwalająca na precyzyjną kalibrację dużych wieloosiowych obrabiarek w krótkim czasie liczonym w godzinach. Do pomiarów używany jest specjalny laser śledzący T3 Laser Tracer współpracujący z opatentowanym aktywnym celem (Active Target).



T3 Laser Tracker z aktywnym celem

Korzystając z modelu CAD obrabiarki, oprogramowanie VEC tworzy kinematyczny model błędu z uwzględnieniem wszystkich osi liniowych i obrotowych. Na tej podstawie wyznaczany jest plan pomiarów, który unika wszelkich kolizji, ale maksymalnie wypełnia przestrzeń roboczą obrabiarki. W całej przestrzeni wyznaczane są punkty reprezentacyjne (200-400 punktów). Symulacja wstępna pozwala sprawdzić, czy nie występują kolizje i czy nie zostanie przerwana wiązka laserowa między laserem a aktywnym celem. Podczas realizowania planu pomiarowego, dla każdego zaplanowanego punktu reprezentacyjnego, wykonywany jest wielokrotnie pomiar (30-100 razy) i metodami statystycznymi obliczana jest średnia wartość błędu.

Wysoko rozwinięte oprogramowanie VEC przetwarza dane pomiarowe w ciągu kilku minut. Może ono symulować ścieżkę narzędzia i wyświetlać graficznie błędy wynikające z niedokładności obrabiarki. Ponadto oblicza tabele kompensacyjne dla dwóch różnych długości narzędzia (krótkie, długie), weryfikuje kompensowane wartości i przesyła je bezpośrednio do sterownika obrabiarki.

Proces przetwarzania wyników programem VEC zajmuje tylko niewielki ułamek czasu potrzebnego przy stosowaniu wcześniejszych metod.

KONIEC